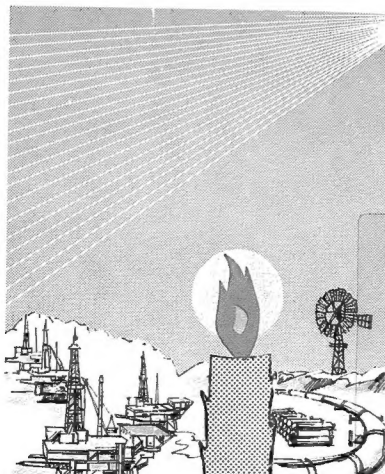


عاهد الخطيب

# مبادئ تحويل الطاقة





**مبادئ تمويل الطاقة**



**عاهد الخطيب**

## **مبادئ تحويل الطاقة**

النشر: دار الشروق للنشر والتوزيع  
عسقلان - الأردن

• عاهد علي الخطيب، ميدىء تحويل الطلقة

• الطلعة الأولى ١٩٨٩م

• جميع الحقوق محفوظة

• الناشر : دار الشروق للنشر والتوزيع

ص.ب ٩٢٦٤٦٢ — هاتف ٦٢٤٢٢١

تلکس ٢٣٥٥٧ بئرنيور

عمّان — الأردن

• التوزيع: المركز العربي لتوزيع المطبوعات

ص.ب ١٧/٥٦٨٧ — تلفون ٨٠٢٥٢٧

تلکس ٢٠٩٨٢ أسيب

بيروت — لبنان

## المقدمة

### بسم الله الرحمن الرحيم

يأتي هذا الجهد المتواضع في إطار محاولة لإيجاد مراجع باللغة العربية لطلبة الجامعات وكليات المجتمع والمعاهد في الدول العربية والتي تقتصر إلى مثل هذه المراجع في مختلف المواضيع العلمية .

ويعي في إعداد مادة هذا الكتاب البساطة والوضوح مع التركيز على المبادئ الأساسية لتحويل الطاقة ، ولزيادة الإيضاح حُرس على حل بعض الأمثلة المساعدة حيثما لزم ذلك .

وقد افترض توافق خلفية علمية لدى الدارس لهذا الكتاب في مواضيع الديناميكا الحرارية وتوليد البخار ومحركات الاحتراق الداخلي ومبادئ الهندسة الكهربائية لكي يتمكن من متابعة موضوع هذا الكتاب وتحقيق الفائدة المرجوة .

صُنِّتْ مادة هذا الكتاب في ثمانية فصول ، تتناول الفصل الأول حاجة الإنسان المتنامية للطاقة واثار الطاقة في تطور المدنية الإنسانية منذ القدم ، ومصادر الطاقة المختلفة من مصادر تقليدية غير متجددة كوقود المستحاثات ومصادر متجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر .

تعرض الفصل الثاني لمبادئ تحويل الطاقة والقوانين التي تحكم عمليات التحويل خصوصاً القانونين الأول والثاني في الديناميكا الحرارية مع مقارنة الكفاءات النظرية والعملية لعمليات تحويل الطاقة المختلفة .

تعرض الفصل الثالث للطرق المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الحرارية مع التركيز على أهمية الاحتراق — ووقود هذا الاحتراق — في هذا المجال ، واختتم الفصل باستعراض وافٍ للحسابات الشمسية المختلفة وأهمية الطاقة الشمسية كمصدر رئيس من مصادر الطاقة الحرارية والتطبيقات العملية المختلفة للطاقة الحرارية من الشمس .

تعرض الفصل الرابع للأنظمة المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة الحرارية كمحركات دورة رانكن - خصوصاً التوربينات البخارية - والمحركات العاملة على الغاز - محرك ستيرلنغ والتوربين الغازي - وإنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة الكيميائية كمحرك الاحتراق الداخلي ومضخة هيمفري . وأخيراً إنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة المائية باستخدام التوربينات المائية المختلفة .

استعرض الفصل الخامس أكثر الطرق شيوعاً في إنتاج الطاقة الكهربائية بشكل مباشر كالتوليد الكيميائي والتوليد الكهروضوئي والتوليد باستخدام طاقة الرياح .

تحدث الفصل السادس عن الطرق الرئيسية المتبعة في تخزين الطاقة بأشكالها المختلفة وأهمية هذا التخزين في التطبيقات العملية .

خُصص الفصل السابع للحديث عن أهمية وفوائد ترشيد استهلاك الطاقة والوسائل المختلفة التي يمكن اتباعها لترشيد هذا الاستهلاك في مختلف قطاعات الاستهلاك على المستويين الفردي والجماعي أو الحكومي .

أما الفصل الثامن والأخير فقد استعرض التلوث البيئي الناتج عن عمليات تحويل الطاقة وأهم الطرق والأجهزة المستخدمة للتخفيف من حدة هذا التلوث . في النهاية أمل أن يكون قد وُفِّت في توفير مادة مفيدة لمدرسينا وللبعثات الأعضاء راجياً من الله العون والتوفيق .

**المؤلف**

١٨ شباط ١٩٨٩م

١١ رجب ١٤٠٩هـ



## المحتويات

الموضوع	الصفحة
المقدمة.....	٥
الفصل الأول : مقدمة عامة :	
١ - ١ التطور التاريخي لاستخدام الطاقة.....	١٣
٢ - ١ معدلات التصوفي استهلاك الطاقة.....	١٧
٣ - ١ زيادة الطلب على الطاقة — تأثير التزايد السكاني والتطور التكنولوجي —	٢٥
٤ - ١ التزامات الطاقة — أبعادها وأسبابها والحلول المناسبة —	٣١
٥ - ١ طبيعة الطاقة.....	٣٤
١ - ٥ - ١ الشغل والطاقة.....	٣٤
٢ - ٥ - ١ الطاقة والقدرة ووحدات القياس.....	٣٤
٣ - ٥ - ١ أشكال الطاقة.....	٣٥
٦ - ١ مصادر الطاقة.....	٤٠
١ - ٦ - ١ مقدمة.....	٤٠
٢ - ٦ - ١ وقود المستحاثات.....	٤١
٣ - ٦ - ١ الطاقة الجيوفيزيائية.....	٥٥
٤ - ٦ - ١ الطاقة الحرارية الجوفية.....	٥٨
٥ - ٦ - ١ الطاقة النووية.....	٥٩
٦ - ٦ - ١ طاقة المد والجزر.....	٦٢
الفصل الثاني : مبادئ تحويل الطاقة :	
١ - ٢ اعتبارات عامة في تحويل الطاقة.....	٧١

الموضوع	الصفحة
---------	--------

٢ - ٢	مبدأ حفظ الطاقة - القانون الأول في التيرموديناميك - ..... ٧٣
٢ - ٢ - ١	تطبيقات على القانون الأول ..... ٧٥
٢ - ٢ - ٢	الطاقة الداخلية ..... ٧٩
٢ - ٢	القانون الثاني في التيرموديناميك ..... ٨٦
٢ - ٢ - ١	دورة كارنوت ..... ٨٧
٢ - ٢ - ٢	المحرك الحراري ..... ٨٩
٢ - ٢ - ٣	مخططات الانتروبيا ..... ٩١
٢ - ٢ - ٤	الثلاجة - دورة التبريد - والمضخة الحرارية ..... ٩٣
٢ - ٤	العوائق العملية في تحويل الطاقة ..... ٩٧
٢ - ٥	اعتبارات عملية في اختيار محولات الطاقة ..... ٩٩

### الفصل الثالث : إنتاج الطاقة الحرارية :

٢ - ١	مقدمة الفصل الثالث ..... ١٠٣
٢ - ٢	الاحتراق ..... ١٠٤
٢ - ٢ - ١	وقود الاحتراق - المواد الهيدروكربونية التركيبية - ..... ١٠٤
٢ - ٢ - ٢	الوقود المعياري ..... ١٠٦
٢ - ٢ - ٣	فيزياء الاحتراق وتفاعلاته ..... ١٠٨
٢ - ٢ - ٤	تفاعل الاحتراق الكيميائي والقيم الحرارية ..... ١١٠
٢ - ٢ - ٥	القيمة النظرية لنسبة الهواء / الوقود ..... ١١٢
٢ - ٢ - ٦	القيمة العملية لنسبة الهواء / الوقود ..... ١١٧
٢ - ٢ - ٧	مبادئ حركات الفحم الحجري ..... ١١٨
٢ - ٢ - ٨	انظمة حرق الوقود الزيتي ..... ١٢٣
٢ - ٢ - ٩	انظمة حرق الوقود الغازي ..... ١٢٦
٢ - ٢	الطاقة الحرارية من الشمس ..... ١٢٩
٢ - ٢ - ١	مقدمة ..... ١٢٩
٢ - ٢ - ٢	الأوقات الشمسية ..... ١٣٠
٢ - ٢ - ٣	الزوايا الشمسية ..... ١٣٤
٢ - ٢ - ٤	قيم الإشعاع الشمسي ..... ١٣٦
٢ - ٤	التطبيقات العملية للطاقة الحرارية من الشمس ..... ١٤٥

### الفصل الرابع : إنتاج الطاقة الميكانيكية :

١٥١	١-٤ تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية.....
١٥١	١-١-٤ محركات دورة رانكن .....
١٦٤	٢-١-٤ المحركات العاملة على الغاز .....
١٧٩	٢-٤ تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية.....
١٧٩	١-٢-٤ محرك الاحتراق الداخلي.....
١٩٦	٢-٢-٤ مضخة هضري.....
٢٠٠	٣-٤ التربينات المائية .....

### الفصل الخامس : إنتاج الطاقة الكهربائية :

٢٠٧	١-٥ مقدمة الفصل الخامس.....
٢٠٨	٢-٥ مبدأ عمل المواد الكهربائي — المتوبة — .....
٢١٧	٢-٥ الطرق المباشرة لتوليد الطاقة الكيميائية.....
٢١٧	١-٢-٥ التوليد الكيميائي.....
٢٢١	٢-٢-٥ التوليد الكهروضوئي.....
٢٢٩	٢-٢-٥ التوليد باستخدام طاقة الرياح.....

### الفصل السادس : تخزين الطاقة :

٢٢٩	١-٦ مقدمة الفصل السادس.....
٢٤١	٢-٦ تخزين الطاقة الميكانيكية.....
٢٤١	١-٢-٦ تخزين طاقة الحركة.....
٢٤٢	٢-٢-٦ تخزين طاقة الوضع.....
٢٤٧	٢-٦ تخزين الطاقة الكيميائية.....
٢٥٠	٤-٦ تخزين الطاقة الكهربائية.....
٢٥٧	٥-٦ تخزين الطاقة الحرارية.....

### الفصل السابع : ترشيد استهلاك الطاقة :

٢٦٣	١-٧ فوائد وأهمية ترشيد استهلاك الطاقة.....
٢٦٥	٢-٧ حفظ الطاقة وتأثير الحمل الشخصي.....
٢٦٧	٣-٧ الطلب على الطاقة والتزود بها في المستقبل.....
٢٦٨	٤-٧ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاعات الاستهلاك المختلفة.....

الموضوع	الصفحة
---------	--------

١ - ٤ - ٧ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاعين المنزلي والتجاري.....	٢٦٨
٢ - ٤ - ٧ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي.....	٢٧٠
٢ - ٤ - ٧ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل.....	٢٧٢

### الفصل الثامن: التلوث البيئي الناتج عن تحويل الطاقة:

١ - ٨ تغيرات المناخ.....	٢٧٧
١ - ١ - ٨ مناخ المدن.....	٢٧٧
٢ - ١ - ٨ الأمطار الحامضية.....	٢٧٨
٢ - ٨ تلوث الهواء.....	٢٨٠
١ - ٢ - ٨ الملوثات الأولية للهواء الجوي.....	٢٨٠
٢ - ٢ - ٨ تلوث الهواء الثانوي.....	٢٨٢
٣ - ٢ - ٨ التلوث داخل البيوت.....	٢٨٥
٢ - ٨ التحكم في تلوث الهواء وبسيطه.....	٢٨٨
١ - ٣ - ٨ التحكم في الدقائق الصلبة العالقة.....	٢٨٨
٢ - ٣ - ٨ التحكم في الملوثات الغازية.....	٢٩٤
٤ - ٨ التلوث الحراري.....	٢٩٥
٥ - ٨ التلوث الناتج عن النفايات الصلبة.....	٢٩٧
ملحق رقم (١).....	٢٩٩
ملحق رقم (٢).....	٣٠٣

\* \* \*

الفصل الاول  
مقدمة عامة



## التطور التاريخي لاستخدام الطاقة

تعتبر الطاقة إحدى المفاهيم المألوفة والشائعة الاستعمال في الحياة اليومية . ويمكن وصف الطاقة بعدة طرق ولكن أيّاً من هذه الطرق لا يعطي تعريفاً متكافئاً للطاقة . فالطاقة هي الحرارة والضوء والكهرباء والقابلية لإنجاز شغل مفيد .

والحياة على هذه الأرض غير ممكنة من دون الطاقة لأن الطاقة هي التي تُغذي النباتات التي تمثل المصدر الأساسي للغذاء لجميع الكائنات الحية . والطاقة هي التي تجعل الإنسان قادراً على الحركة وتشغل جميع الوسائل التي يستخدمها في تنقلاته .

استعمل الإنسان البدائي عضلاته فقط لتحويل الطاقة إلى شغل مفيد . وفي بداية التاريخ الإنساني توافر للإنسان مصدران أساسيان للطاقة هما طاقة الشمس الإشعاعية والطعام الذي يتناوله . وعندما اكتشف الإنسان النار كانت تلك أسرع وسيلة استخدمها لتحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في أخشاب الأشجار إلى طاقة حرارية . وبعد ذلك اكتشف الإنسان مصادر أخرى للطاقة الكيميائية ( الوقود ) مثل الغاز الطبيعي والفحم الحجري والنفط .

إن الطاقة الكيميائية المخزنة في الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي والتي تعدّ المصادر الرئيسة للطاقة في وقتنا الحاضر هي في الأصل طاقة شمسية . ذلك لأن الطاقة الشمسية اختُزنت في النباتات ( بواسطة عملية التمثيل الضوئي ) ومن ثم في الكائنات الحية التي تتغذى على هذه النباتات خلال فترات نموها .

وقد تحولت هذه الكائنات من نباتات وحيوانات إلى فحم حجري وبنفط في

بالمثل الأرض عبر العصور السحيقة بفعل الضغط ودرجات الحرارة المرتفعة كما يرى أغلب المختصين في هذا المجال .

اكتشف الفحم الحجري في القرن الثامن عشر وتم فيما بعد استخراج غاز من هذا الفحم استعمل للإضاءة ، ثم تمكن الإنسان بعد ذلك من تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية عند اكتشافه للآلة البخارية ، وكانت أول مضخة حرارية استعمل الخشب كوقود لها هي تلك التي اخترعها الإنجليزي توماس ساغري عام ١٦٩٨ م . وفي عام ١٧٩١م اخترع الإيطالي الساندرو فولتا المركم الرصاصي الكهربي الذي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية . وبعد ذلك بحوالى قرن تم تطوير كل من المحرك الكهربي والمولد الكهربي ( الدينامو ) حيث أصبح بالإمكان بواسطتهما تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية وبالعكس .

حفر أول بئر للنفط في العالم في ولاية بنسلفانيا الأميركية عام ١٨٥٩م ، وفي عام ١٨٦٠م قام مهندس فرنسي يدعى جين جوزيف ببناء أول محرك احتراق داخلي وكان هذا المحرك ذا فعالية منخفضة ، وفي عام ١٨٧٦م اخترع الألماني نيكولاس اوتو محرك الاحتراق الداخلي ذي الأشواط الأربعة ، ثم قام عالم الماني آخر بعد ذلك باختراع المكربن ( المغذي Carburater ) ثم قام عالم الماني ثالث بتصميم أول محرك سيارة يعمل بالبنزين . ومنذ ذلك الحين أخذت صناعة للسيارات تتطور بسرعة وأصبح النفط مصدراً هاماً للطاقة كالفحم الحجري ، وتعددت استعمالاته في الميادين كافة ، فقد استخدمت مركبات الوقود الزيتي الخفيفة في مجال التدفئة المركزية، كما استخدمت مركباته الثقيلة في تشغيل محركات السفن في حين استخدم زيت الديزل في المركبات الأرضية الثقيلة والقطارات وفي إنتاج الكهرباء في محطات التوليد .

استخدم البنزين كمصدر للطاقة في الجيل الأول من محركات الطائرات ثم استخدم الكيروسين ( الكاز ) في وقت لاحق في محركات الطائرات النفاثة الحديثة .

خلال التنقيب عن النفط ، اكتشف المهندسون مصدراً هاماً آخر من مصادر الطاقة الكيميائية هو الغاز الطبيعي المكون من الميثان ( methane ) بشكل رئيس .



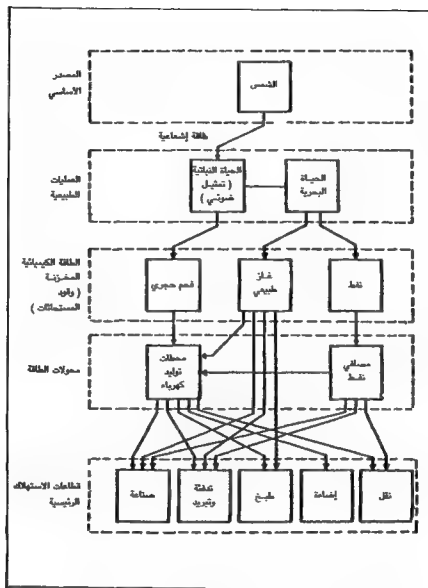
وقد استخدم هذا الغاز بشكل واسع في الصناعة وتدفئة المنازل وتبريدها  
وتم إيصاله للبيوت بواسطة أنابيب أو بتعبئته كسائل في اسطوانات مضغوطة وذلك  
لاستخدامه في إنتاج الطاقة الحرارية .

كما رأينا فإن الشمس هي المصدر الأساسي للطاقة على هذه الأرض. ويمكن  
تمثيل انسياب الطاقة من الشمس إلى محطات الاستهلاك الرئيسية للطاقة بواسطة  
المخطط في الشكل ( ١ - ١ ) .

اعتمد تقدم وتطور الحضارة البشرية عبر حقب التاريخ المختلفة إلى حد  
بعيد على تطور مقدرة الإنسان على تسخير الطاقة من مصادرها المختلفة لمواجهة  
المتطلبات الماكبة لهذا التطور . يبين الجدول ( ١ - ١ ) العلاقة الوثيقة بين تقدم  
المجتمعات البشرية في ضوء تطور استهلاكها من الطاقة عبر حقب التاريخ .

المدن	كيلوغرام فحم حجري مكثف في اليوم
المجتمع البدائي	٠,٢
المجتمع الاقطاعي	٠,٧
المجتمع الزراعي البدائي	١,٨
المجتمع الزراعي المتطور	٢,٨
المجتمع الصناعي	١١,٢
المجتمع المتطور تكنولوجياً	٣٢,٢

الجدول ( ١ - ١ )  
تغيرات الاستهلاك الفردي للطاقة في الأتوار التاريخية المختلفة



الشكل ( ١ - ١ )  
 انسياب الطاقة من الشمس  
 إلى قطاعات الاستهلاك الرئيسية

## ٢ - ١

### معدلات النمو في استهلاك الطاقة

عندما تتزايد قيمة كمية — كالقدرة مثلاً — بمعدل ثابت  $i$  في كل عام ، يمكن إيجاد تغير هذه القيمة الكمية الزمني من المعادلة الآتية :

$$\frac{dp}{dt} = pi \quad (١ - ١)$$

وإذا افترضنا أن القدرة الابتدائية هي  $(P_0)$  عند زمن اختياري  $(t = 0)$  ، يمكن إجراء تكامل لطرفي المعادلة  $(١ - ١)$  :

$$\int_{P_0}^P \frac{dp'}{p'} = \ln \left( \frac{p}{P_0} \right) = \int_0^t i \, dt = it \quad (٢ - ١)$$

وبذلك تكون :

$$P = P_0 e^{it} \quad (٣ - ١)$$

يمثل الرمز  $(e)$  أسس اللوغاريتمات الطبيعية الذي يساوي  $(2.7182818...)$  .

لنفترض أن  $(td)$  هو زمن المضاعفة  $(doubling \, time)$  أي الزمن اللازم لتصبح القدرة المستهلكة ضعف القدرة الابتدائية فيمكن إيجاد هذا الزمن من

المعادلة ( ١ - ٢ ) وذلك بتمويض (  $P = 2p_0$  ) و (  $t_d = t$  ) في المعادلة ( ١ - ٢ )

$$2p_0 = p_0 e^{itd}$$

بقسمة طرفي المعادلة على (  $p_0$  ) واخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة

$$\ln(2) = \ln(e^{itd}) \Rightarrow \ln(2) = itd$$

$$td = \ln(2) / i = 0.0693 / i \quad ( ١ - ٤ )$$

وكمثال تطبيقي على المعادلة ( ١ - ٤ ) ليكن معدل النمو في استهلاك القدرة الكهربائية في بلد ما هو ٧ ٪ في العام فإن زمن المضاعفة (  $t_d$  )

$$td = 0.0693 / 0.07 = 9.9 \text{ years}$$

يمكن إيجاد الطاقة المستهلكة خلال فترة زمنية معينة بإجراء تكامل للمعادلة ( ١ - ٢ ) خلال تلك الفترة الزمنية. وإذا أردنا إيجاد الطاقة المستهلكة خلال فترة زمنية سابقة وطويلة جداً فإنه أمر طبيعي أن نفترض أن زمن البداية هو (  $t = -\infty$  )

فتكون الطاقة الكلية المستهلكة (  $E_0$  ) من الزمن (  $t = -\infty$  ) إلى زمن اختياري (  $t = t_1$  ) هي :

$$E_0 = \int_{-\infty}^{t_1} p_0 e^{it} dt = \frac{p_0}{i} e^{it} \bigg|_{-\infty}^{t_1}$$

$$= \frac{p_0}{i} e^{it_1} - \frac{p_0}{i} e^{i(-\infty)} = \frac{p_0}{i} e^{it_1} - 0$$

$$E_0 = \frac{p_0}{i} e^{it_1} \quad ( ١ - ٥ )$$

وتكون الطاقة المستهلكة فترة زمنية من (  $t = t_1$  ) إلى (  $t = t_2$  ) هي :

$$E_1 = \int_{t_1}^{t_2} p_0 e^{it} dt = \frac{P_0}{i} (e^{it_2} - e^{it_1})$$

$$= \frac{P_0}{i} e^{it_1} (e^{i(t_2 - t_1)} - 1)$$

$$E_1 = E_0 (e^{i(t_2 - t_1)} - 1) \quad (٦-١)$$

إذا عوضنا (  $td = t_2 - t_1$  ) في المعادلة ( ٦ - ١ ) نحصل على  
النتيجة (  $E = E_0$  )

وهذا يعني أن الطاقة المستهلكة خلال زمن المضاعفة (  $td$  ) لو فترة  
التضاعف تساوي الطاقة الكلية المستهلكة خلال الزمن المماثل لهذه الفترة .

مثال ١ - ١ :

إذا علمت أن استهلاك الأرض من النفط عام ١٩٨١م هو ١,٨١ مليون طن،  
ما هو مقدار الاستهلاك المتوقع من النفط عام ١٩٩٠م بفرض أن معدل النمو في  
الاستهلاك خلال هذه الفترة يبقى ثابتاً ويساوي ٩,٥ ٪ في العام؟ وما هو الزمن  
اللازم لكي يتضاعف استهلاك الأرض من النفط إذا بقي معدل النمو في الاستهلاك  
ثابتاً خلال فترة التضاعف ؟

نفرض أن (  $P$  ) هو استهلاك الأرض من النفط في سنة معينة

$$P_{90} = P_{81} e^{it}$$

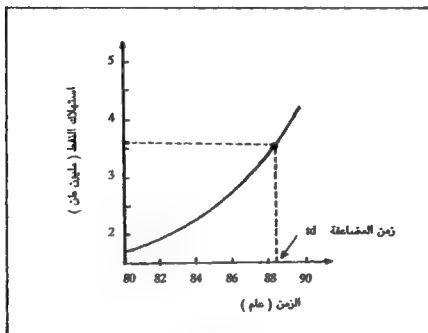
$$t = 1990 - 1981 = 9 \text{ years}$$

$$P_{90} = 1.81 e^{(0.095)(9)} = 4.26 \text{ ( million ton / year )}$$

ويكون زمن المضاعفة (  $td$  )

$$td = 0.693 / i = 0.693 / 0.095 = 7.3 \text{ years}$$

يبين الشكل ( ١ - ٢ ) منحنى تزايد ( نمو ) استهلاك النفط في الأردن في الفترة الواقعة بين عامي ( ١٩٨٠ - ١٩٩٠ م ) بالاعتماد على القيم المحسوبة في مثال ١ - ١ ، وكما نلاحظ من الرسم فإن الاستهلاك يتضاعف عما كان عليه عام ١٩٨١ م وذلك في عام ١٩٨٨ م تقريباً .



الشكل ( ١ - ٢ )  
نمو استهلاك النفط في الأردن

#### مثال ١ - ٢ :

قُدِّر استهلاك الأردن من الطاقة عام ١٩٨٢ م بحوالي  $٢,٢ \times ١٦١٠$  جول. احسب مقدار ما كان عليه هذا الاستهلاك عام ١٩٧١ م ، وإذا علمت أن معدل النمو في الاستهلاك خلال الفترة الزمنية بين عامي ( ٧١ - ٨٢ م ) هو ١٢,٨ ٪ في العام، احسب مقدار الاستهلاك المتوقع عام ١٩٩٠ م . ويفرض أن

معدل النمو في الاستهلاك خلال الفترة الزمنية ( ٨٢ - ٩٠ م ) ثابت ومقداره ٨ % في العام . ما هو الزمن اللازم ليصبح الاستهلاك ضعف ما كان عليه عام ١٩٨٢ م ، ثم احسب الطاقة التي استهلكها الأردن في الفترة ( ٧١ - ٨٢ م ) .

$$P_{82} = P_{71} e^{it}$$

$$t = 1982 - 1971 = 11 \text{ years}$$

استهلاك الأردن من الطاقة عام ١٩٧١م

$$2.2 \times 10^{16} = P_{71} e^{(0.138)} \quad (11)$$

$$P_{71} = 2.2 \times 10^{16} / e^{1.518} = 4.82 \times 10^{15} \text{ J / year}$$

أي أن الاستهلاك عام ٨١م زاد عنه عام ٧١م بمقدار

$$2.2 \times 10^{16} / 4.82 \times 10^{15} = 4.56 \text{ times}$$

الاستهلاك عام ٩٠م

$$P_{90} = P_{82} e^{(0.08)} (90 - 82)$$

$$= 2.2 \times 10^{16} e^{0.64} = 4.17 \times 10^{16} \text{ J}$$

زمن المضاعفة (  $t_d$  )

$$t_d = 0.693 / i = 0.693 / 0.08 = 8.7 \text{ years}$$

يتضاعف الاستهلاك عما كان عليه عام ٨٢م في عام

$$1982 + 8.7 \approx 1991$$

مجموع الطاقة الكلية المستهلكة قبل عام ٧١م

$$E(71 - 82) = \frac{P_0}{i} e^{it_1} (e^{i(t_2 - t_1)} - 1)$$

$$P_0 = P_{71} = 4.82 \times 10^{15} \text{ J / year}$$

$$t_1 = 0 \rightarrow t_2 = 82 - 71 = 11 \text{ years}$$

$$E(71 - 82) = \frac{4.82 \times 10^{15}}{0.138} [e^{(0.138)(11)} - 1] = 1.81 \times 10^{16} \text{ J}$$

مثال ١ - ٣ :

تُدر الاحتياطي العالمي من طاقة الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي عام ١٩٧٠م بحوالي  $٢,٢ \times ١٠^{٢١}$  جول. إذا علمت أن استهلاك العالم من الطاقة عام ١٩٧٠م هو  $٧,٠٤٥ \times ١٠^{١٠}$  جول فما هي الفترة الزمنية اللازمة لاستنفاد هذا الاحتياطي بفرض أن معدل النمو في الاستهلاك للعالم من الطاقة يبقى ثابتاً ويساوي ٥ % في العام؟

$$P_0 = P_{70} = 2.045 \times 10^{20} \text{ J / year}, i = 0.05$$

نفرض أن عام ٧١ يقابل زمن اختيار هو  $t_1 = 0$

$$E_1 = E_{70} = 2.2 \times 10^{23} \text{ J}$$

$$E_1 = \frac{P_0}{i} e^{it_1} (e^{i(t_2 - t_1)} - 1)$$

$$2.2 \times 10^{23} = \frac{2.045 \times 10^{20}}{0.05} e^{(0)} [e^{(0.05)(t_2 - 0)} - 1]$$

$$2.2 \times 10^{23} = \frac{2.045 \times 10^{20}}{0.05} [e^{0.05t_2} - 1]$$

$$e^{0.05t_2} - 1 = 53.79$$

$$e^{0.05t_2} = 54.79$$

$$0.05t_2 = \ln(54.79) = 4$$

$$t_2 = 4 / 0.05 = 80 \text{ years}$$



أي أن الاحتياطي العالمي من هذه المصادر الثلاثة سوف ينقذ في عام

$$1970 + 80 = 2050$$

ملاحظة : تُعدّ هذه المصادر من نطفة وقحف حجري وغاز المصادر الرئيسية للطاقة في العالم وتشكل أكثر من ٩٠ ٪ من مجموع الطاقة المستهلكة .

مثال ١ - ٤ :

كان استهلاك الأربن من النفط عام ١٩٨٢م يساوي ٢,٤ مليون طن والذي هو أعلى بمقدار ٢ ٪ من استهلاك عام ١٩٨٢م . إذا كان الاكتشاف الحديث للنفط في الأردن ، يمكن أن ينتج ما مقداره ٤٠٠ برميل ( barrel ) في اليوم ( طن النفط يساوي ٧ براميل تقريباً ) :

١ - في أي عام كانت كمية النفط المكتشفة ، يمكن أن تفي باحتياجات الأردن من النفط بافتراض أن معدل النمو المذكور كان ثابتاً ؟

٢ - إذا كانت منطقة النفط المكتشف بحاجة إلى خمس سنوات ( ابتداءً من عام ١٩٨٢م ) للتطوير وحفر المزيد من الآبار ، فما مقدار الإنتاج المطلوب - في نهاية هذه الفترة - لسدّ احتياجات الأردن من النفط ؟

٣ - إذا لم يتم اكتشاف المزيد من النفط - غير الكمية المكتشفة والتي تساوي ٤٠٠ برميل في اليوم - ، فكم تكفي هذه الكمية محطة الحسین الحرارية في الزرقاء إذا كانت قدرة هذه المحطة تساوي ٣٦٥ ميغاواط ( القدرة القصوى ) إذا علمت أن الكفاءة الحرارية للمحطة هي ٣٥ ٪ والقيمة الحرارية العليا للنفط الخام ( H H V ) هي ٤٢١٠٠ كيلوجول / كغم .

١ - في عام ١٩٨٢م كان الاستهلاك يساوي (  $2.4 \times 10^6 \text{ ton / year}$  )

$$i = 0.02 \quad \text{معدل النمو}$$

$$\frac{400}{7} \times 365 = 20857.14 \text{ ton / year} \quad \text{الاستهلاك السنوي}$$

كان هذا الاستهلاك كافي في عام

$$P = p_0 e^{it}$$

$$P_{g3} = p_0 e^{it}$$

$$2.4 \times 10^6 = 20857.14 e^{0.02 t}$$

$$t = 237.3 \text{ years}$$

$$\text{year} = 1983 - 237.3 = 1746$$

$$P_{g8} = P_{g3} e^{it} \quad \text{--- ٧}$$

$$P_{g8} = 2.4 \times 10^6 e^{0.02 \times 5} = 2.65 \times 10^6 \text{ ton / year}$$

٢ — القدرة الحرارية = القدرة الكهربائية / الكفاءة الحرارية

$$P_{th} = 365 \times 10^3 \text{ KW} / 0.35 = 10.429 \times 10^5 \text{ KW}$$

الطاقة الحرارية المستهلكة في اليوم

$$E_{th} / \text{day} = 10.429 \times 10^5 \frac{\text{KJ}}{\text{s}} \times 24 \times 3600 \text{ S} = 9.01 \times 10^6 \text{ KJ}$$

كمية الوقود اللازمة في اليوم

$$\text{Fuel} / \text{day} = 9.01 \times 10^{10} \text{ KJ} / 42100 \text{ kg} = 2.14 \times 10^6 \text{ kg}$$

$$1 \text{ barrel} = \frac{1000}{7} = 142.86 \text{ kg}$$

كمية الوقود المتوفرة في اليوم

$$\text{Fuel available} / \text{day} = 142.86 \times 400 = 57144 \text{ kg}$$

زمن تشغيل المحطة باستخدام كمية الوقود المتوفرة

$$\text{Time} = \frac{57144 \text{ kg}}{2.14 \times 10^6 \text{ kg} / \text{day}} = 0.0267 \text{ day}$$

$$\text{Time} = 0.0267 \text{ day} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{day}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} = 38.45 \text{ minutes}$$

## زيادة الطلب على الطاقة تأثير التزايد السكاني والتطور التكنولوجي

يحتاج الإنسان إلى الطاقة لتسيير جميع مناحي حياته اليومية، فالطاقة ضرورية لطبخ الطعام وإنارة البيوت والشوارع وتشغيل جميع الأجهزة الكهربائية المستخدمة في البيوت لتحقيق الراحة للإنسان. والطاقة ضرورية أيضاً في النقل بمختلف أنواعه وفي الصناعة . وفي مجال الزراعة تحول الإنسان من الاعتماد على الحيوانات إلى الاعتماد — بشكل متزايد — على الآلات الزراعية المختلفة التي تستخدم بعض مشتقات النفط كوقود لها خصوصاً زيت الديزل .

في المناطق الحضرية ( Urban ) خصوصاً ، فإن قطاعات كبيرة من السكان تستهلك كميات متزايدة من الطاقة لتوفير ظروف معيشة أكثر راحة ورفاهية في البيوت .

ولا يزال الطلب على الطاقة يزداد يوماً بعد يوم ، ويمكن إرجاع ذلك لسببين رئيسيين هما : (١) الزيادة المضطردة في عدد السكان (٢) ازدياد استهلاك الفرد للطاقة باستمرار بسبب زيادة التقدم التكنولوجي وتطور وسائل الترفيه والراحة .

يتزايد مقدار السكان في العالم بمعدل ٢ ٪ تقريباً في كل عام ، في حين أن معدل استهلاك الطاقة العالمي يزداد بمعدل يصل إلى ٥ ٪ أو أكثر في كل عام وذلك تبعاً للأرقام المتوافرة بين عامي ١٩٦٠م و١٩٧٨م. ويبين الجدول ( ١ - ١ ) التطور في استهلاك مصادر الطاقة الأولية في الفترة الزمنية الواقعة بين عامي ( ١٩٦٠ - ١٩٧٨ م ) .

مصدر الطاقة	١٩٦٠م (مليون طن)	%	١٩٧٨م (مليون طن)	%	معدل النمو المستوي المركب (٦٠ - ٧٨)
الوقود الصلب	٢٣٠٦	٥٢	٢٨٠٣	٣٢	١,٢
الوقود المسال	١٣٦٢	٣٢	٢٩٥٩	٤٥	٦,١
الغاز الطبيعي	٥٩٣	١٤	١٧٢٧	٢٠	٦,٢
الكهرباء (كهرومائية + ذرية)	٨٥	٢	٢٥٦	٣	٦,٢
المجموع	٤٣٤٦	١٠٠	٨٧٥٥	١٠٠	٤,١

#### الجدول (١ - ١)

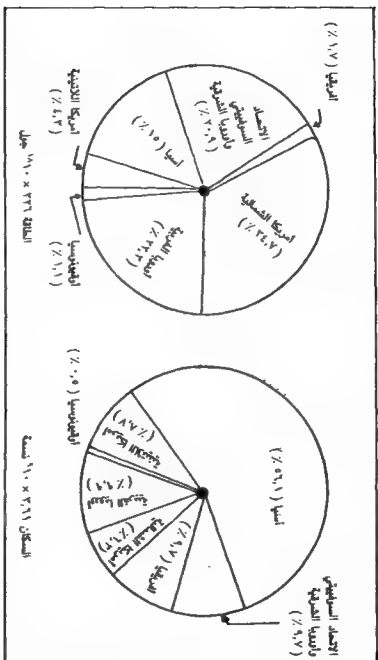
تطور استهلاك المصدر الأولية للطاقة بين عامي (١٩٦٠ - ١٩٧٨م)

يتوزع الاستهلاك العالمي للطاقة بشكل غير متساو بين قارات العالم المختلفة كما هو مبين في الشكل (١ - ٢) الذي يبين التوزيع المئوي لاستهلاك الطاقة والسكان في العالم لعام ١٩٧٠م. ومن هذا الشكل نجد أن أمريكا الشمالية — التي يشكل عدد سكانها ٦,٣٪ فقط من سكان العالم — تستهلك حوالي ٣٥٪ من الطاقة العالمية، في حين أن قارة آسيا بأكملها — التي يشكل عدد سكانها أكثر من ٥٦٪ من سكان العالم — تستهلك ١٥٪ فقط من الطاقة العالمية.

إن هذا التوزيع لاستهلاك الطاقة بين قارات العالم لم يتغير كثيراً بعد عام ١٩٧٠م وإن كان قد انخفض قليلاً بالنسبة لأمريكا الشمالية حيث بلغ نحو ٣١,٣٪ عام ١٩٧٨م (نسبة استهلاك الولايات المتحدة شكلت حوالي ٢٨,٦٪ من الطاقة العالمية لنفس العام).

ويمكن أن نأخذ فكرة عن احتياجات العالم المستقبلية للطاقة إذا علمنا أن الولايات المتحدة التي تستأثر بأكبر نصيب من استهلاك الطاقة العالمي سوف تستهلك بحلول عام ٢٠٠٠م أكثر مما استهلكته عبر تاريخها، ومن المتوقع أن تتراجع نسبة استهلاكها إلى ٢٥٪ من الاستهلاك العالمي وذلك نتيجة لارتفاع معدلات النمو في السكان لبقية العالم عن معدل الولايات المتحدة ونتيجة للتقدم الصناعي المتزايد في الدول النامية وازدياد استهلاك الطاقة.

إن معدل ما يستهلكه الفرد الأمريكي حالياً يزيد عن خمسة أضعاف



الشكل (١-٣) التوزيع السكاني في المنطقة والسكان في العالم لعام ١٩٧٠ م

ما يستهلكه الفرد العالمي ، في حين أنه من المنتظر أن يصل معدل استهلاك الفرد العالمي إلى حوالي ١ / ٢ معدل الفرد الأمريكي عام ٢٠٠٠ م .

يبين الجدول ( ١ - ٢ ) استهلاك الطاقة في بعض البلدان العربية والعالمية لعام ١٩٧٨ م ، ويبين الجدول ( ١ - ٢ ) تطور معدل الاستهلاك الفردي العالمي للطاقة في الفترة ( ١٩٠٠ - ١٩٧٨ م ) .

البلد أو المنطقة	الاستهلاك (مليون طن متري)	نسبة الاستهلاك من العالم (%)	استهلاك الفرد (كغم)
الأرجنتين	١,٥٩٦	٠,٠٢	٥٣٥
الإمارات العربية المتحدة	٤,٥٢٦	٠,٠٥	١٨٥٤٨
الجزائر	١٢,٧٢٧	٠,١٥	٦٨٧
سوريا	٧,٨٣٦	٠,٠٩	٩٦٨
للعراق	٧,٨٠١	٠,٠٩	٦٣٣
السودان	٢,٩٠٤	٠,٠٣	١٧٢
قطر	٢,٣٨٩	٠,٠٣	٢٣٦٥٨
الكويت	٨,١١٢	٠,٠٩	٦٧٧١
مصر	١٨,٢٤١	٠,٢١	٤٦٣
العمانية	١٢,٨١٥	٠,١٥	١٣٠٦
أندونيسيا	٤٠,٨٣٣	٠,٤٧	٢٧٨
فنزويلا	٣٩,٢٢	٠,٤٥	٢٩٨٩
نيجيريا	٧,٢٩٧	٠,٠٨	١٠٦
الولايات المتحدة	٢٥٠٢,١٣٢	٢٨,٥٨	١١٢٧٤
المكسيك	٩٢,٦٢١	١,٠٦	١٢٨٤
أوروبا الغربية	١٥٦٦,٣٥٨	١٧,٨٩	٤٢٤٥
الاتحاد السوفييتي	١٤٤٥,٤٣٩	١٦,٥١	٥٥٠٠
الصين	٧٦٦,٣٣٥	٨,٧٥	٨٣٧

الجدول ( ١ - ٢ )  
استهلاك الطاقة في بلدان مختارة  
من العالم العربي وبقية العالم

السنوات	كيلوغرام مكافئ فحم حجري
١٩٠٠	٥٩٠
١٩٥٠	١٦٠٠
١٩٦٠	٢١٠٠
١٩٧٠	٢٩٠٠
١٩٧٨	٢٠٧٤

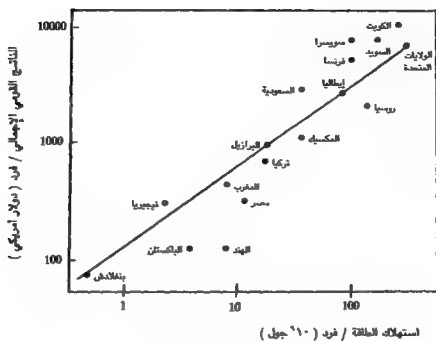
الجدول ( ١ - ٣ )

تطور معدل الاستهلاك الفردي للعالمي للطاقة

إن الزيادة — غالباً — في استهلاك الطاقة يصاحبها ارتفاع في مستوى المعيشة ممثلاً في زيادة الناتج القومي الإجمالي ( Gross National Product, GNP ) للبلد .

وكما هو مبين في الشكل ( ١ - ٤ ) هناك علاقة خطية بين استهلاك الطاقة الفردي وبين الناتج القومي الإجمالي الفردي . ومن هذا الشكل نرى أن بعض البلدان مثل الولايات المتحدة والكويت وموسيرا والسويد ذات ناتج قومي إجمالي واستهلاك طاقة مرتفعين ، في حين أن هناك بلداناً أخرى كالهند والباكستان ذات ناتج قومي إجمالي واستهلاك طاقة منخفضين .

ازداد استهلاك الطاقة في الأردن بشكل كبير جداً حيث بلغ معدل النمو السنوي في الاستهلاك في الفترة الواقعة بين عامي ( ١٩٧٤ — ١٩٨٤ م ) نحو ١٢,٦ ٪ ولكنه عاد وانخفض إلى ٢,١ بين عامي ١٩٨٥ و ١٩٧٨، في حين ارتفع الناتج القومي الإجمالي الفردي من حوالي ٥٣٧ ديناراً عام ١٩٨٠م إلى حوالي ٧١٣ ديناراً عام ١٩٨٢م، ولكنه عاد وتراجع إلى حوالي ٦٨٠ ديناراً عام ١٩٨٧م . فالأردن كغيره من الدول النامية يواجه مشكلة الزيادة المتواصلة في معدلات استهلاك الطاقة ، ولعل ذلك يرجع أساساً إلى التوسع والنمو الذي طرأ على مختلف القطاعات الصناعية والتجارية وقطاع النقل وإلى استمرارية نشر خدمة التيار الكهربائي في مختلف المناطق وما يقترب على ذلك من زيادة وتشجيع لاستهلاك الطاقة الكهربائية. إذ أنه حتى عام ١٩٧٩م كانت خدمة التيار الكهربائي تقتصر على ٥٥ ٪ من سكان الأردن فقط.



الشكل (١ - ٤)  
العلاقة بين الناتج القومي الإجمالي / فرد  
واستهلاك الطاقة / فرد لبعض البلدان لعام ١٩٧٥م



## أزمات الطاقة : أبعادها وأسبابها والحلول المناسبة

تحسنت ظروف الإنسان المعيشية تحسناً ملموساً خلال القرون الأربعة الأخيرة، خصوصاً في بلدان أوروبا الغربية بعد الثورة الصناعية في القرن السابع عشر ، وبدأت عملية انتشار الآلات تزداد بشكل واسع وذلك بعد اختراع الآلة البخارية وتطورها ، وظهرت ملامح أول أزمة وقود في العالم في بريطانيا متمثلة في حدوث نقص في إمدادات أخشاب الأشجار المستعملة كوقود لهذه الآلات الحديدية ، ولكن تم السيطرة على هذه الأزمة وذلك باستخدام الفحم الحجري بدلاً من الأخشاب كوقود لهذه الآلات وإحلال فحم الكوك ( Coke ) مكان الفحم النباتي كمصدر للحرارة في أفران صهر الحديد . وهكذا أوجدت الثورة الصناعية طريقاً جديدة زادت من الإنتاجية وساهمت في تحسين ظروف الحياة لقطاع كبير من الناس .

وصلت الصناعات المعتمدة على الفحم الحجري والآلات البخارية ذروتها في أواخر القرن التاسع عشر ، وكان الاستغلال لمصادر الطاقة المتوفرة على أشده في تلك الفترة .

وببزوغ عصر النفط واستخدامه كمصدر أساسي للوقود واكتشاف المولد الكهربائي ( الدينامو ) ، فإن ذلك أحدث تغييراً كبيراً جداً في أنماط الحياة في البلدان الأوروبية. وامتد هذا التغيير فيما بعد ليشمل بلداناً أخرى عديدة خصوصاً البلدان التي اكتشف فيها النفط بكميات كبيرة . ورافق هذا التغيير أيضاً تطور استخدام محركات الاحتراق الداخلي ( Internal combustion engines ) في قطاعات الصناعة والنقل والآلات الزراعية ، وبنهاية الحرب العالمية الثانية أصبح

النفط كمصدر للطاقة أرخص بكثير من الفحم الحجري ، مما أدى إلى تحول معظم الصناعات من الفحم الحجري إلى النفط مما زاد الطلب عليه بشكل حاد .

إن هذا التغير في أنماط استغلال الوقود — مع وجود التصنيع الثقيل وزيادة الاعتماد على الآلة — أدى إلى حدوث نقص في إمدادات الوقود ، وأطلق على ذلك اسم أزمة الطاقة ( Energy crisis ) . وكان لقرار بعض الدول العربية المنتجة للنفط في خريف عام ١٩٧٣م بحظر تصدير النفط للغرب أثر مباشر على الارتفاع المفاجيء والحاد في أسعار النفط العالمية ( أربعة أضعاف السعر قبل الحظر ) .

وأي ذلك إلى رتود فعل عالمية واسعة خصوصاً من قبل البلدان الكبرى المصنعة في أمريكا الشمالية وأوروبا الغربية واليابان التي كانت تعتمد على النفط الرخيص بشكل متزايد في معظم صناعاتها ، ولم يقتصر هذا التأثير على الدول المصنعة بل امتد إلى الدول النامية التي تعتمد على مشتقات النفط كمصدر أساسي لاحتياجاتها من الطاقة ومصدر هام للأسمدة المستعملة في تخصيب الأراضي الزراعية ، وقد أدى كل ذلك إلى تفاقم ما يسمى بأزمة الطاقة .

كما ذكرنا سابقاً فإن تزايد الطلب على الطاقة يعزى إلى تزايد عدد السكان وزيادة استهلاك الفرد من الطاقة نتيجة للتطور والتقدم التكنولوجي واختراع الإنسان لوسائل الراحة والترفيه وزيادة اعتماده على الآلة في كافة شؤون حياته ، وإذا أراد الإنسان المحافظة على مستوى معيشته وحضارته فلا بد له من إيجاد الحلول المناسبة لمشكلة الطاقة ، والاقتراحات التالية تقدم بعض الحلول الممكنة لأزمة الطاقة :

١ — تقليل اعتماد الإنسان على مصادر الطاقة التقليدية ( غير المتجددة ) من فحم حجري وبنط وغاز طبيعي والتحول إلى مصادر الطاقة المتجددة ما أمكن ذلك ، فهناك الكثير من مصادر الطاقة المتجددة التي لم يتم استغلالها بشكل مرض . فالطاقة الكهرومائية وطاقة الريح — اللتان يمكن الحصول على الطاقة الكهربائية منهما مباشرة — لم يتم استغلال سوى نسب قليلة منهما ، أما طاقة المد والجزر ، فلا يتم استغلال سوى جزء بسيط منها في أماكن محدودة من العالم، وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الحرارية الجوفية . ويمكن أن تلعب بعض المصادر الثانوية الأخرى كخشب الأشجار ومخلفات الزراعة والقلمة دوراً هاماً في حل مشكلة الطاقة إذا تم التوسع في استغلالها خصوصاً في الدول النامية، فهي

مصادر متوافرة في كل مكان تقريباً وبشكل مستمر . ويرى بعض المختصين أن الطاقة النووية يمكن ان تقدم حلاً جذرياً لازمة الطاقة إذا تم استغلالها على نطاق واسع، خصوصاً بعد التقدم الطمي الكبير في تصنيع المفاعلات النووية، وإن كانت مشكلة التلوث وخطار الصوادث قائمة بالنسبة لهذا المصدر الهائل من الطاقة ، وأهم مشاكل التلوث النووي هي مشكلة التخلص من النفايات المشعة التي تولدها المفاعلات النووية .

بقي أن نشير إلى أهم مصدر من مصادر الطاقة المتجددة الا وهو الطاقة الشمسية، فعلى الرغم من التقدم الكبير الذي تم إحرازه في استغلالها في بعض التطبيقات المباشرة كتسخين المياه في المنازل وتطية المياه المالحة والاقران الشمسية وغيرها ، إلا أن أهم مجال لاستخدامها في إنتاج الطاقة الكهربائية على نطاق واسع لا يزال محدوداً ومحصوراً في بعض الدول المتقدمة علمياً ، وأخيراً فإن هناك بعض المصادر الأخرى غير المتجددة التي لا يتم استغلالها بشكل واسع مثل الصخر الزيتي ( Shale Oil ) الذي يتوافر منه احتياطي كبير في الأردن .

٢ — تقليل الفوائد أو الضياعات من اجهزة تحويل الطاقة خصوصاً محطات التوليد الكبيرة، حيث انه بالإمكان الاستفادة من الغازات العادمة ذات درجة الحرارة العالية بدلا من تركها تنطلق في الجو ، وهناك وسائل أخرى عديدة لتقليل الفوائد من هذه المحطات . أما على مستوى الأفراد فإنه بالإمكان توفير الطاقة وذلك بواسطة الاستخدام الصحيح لأجهزة تحويل الطاقة في المنازل . ويرى بعض الخبراء المختصين انه بالإمكان توفير نصف الطاقة الحرارية المنتجة في المنازل في وقتنا الحاضر إذا تم استخدام اجهزة الطاقة في البيوت بوعي اكبر وتجنب الأفراد بعض الممارسات المبالغ بها والتي تؤدي إلى هدر الطاقة ، كتشغيل اجهزة التدفئة في الايام المعتدلة او عدم إيقافها عن العمل عند الخروج من البيت لفترات طويلة .

## ١ - ٥

### طبيعة الطاقة

#### ١ - ٥ - ١ الشغل والطاقة :

يُعرف الشغل بأنه حاصل ضرب القوة في المسافة التي تتحركها نقطة تأثير القوة في اتجاه هذه القوة . ويمكن تعريف الطاقة بأنها القابلية لإنجاز شغل . فعند رفع جسم ( كتلة ) مسافة معينة فإنه يلزم قوة أكبر بقليل من وزن هذا الجسم في اتجاه معاكس لاتجاه تأثيره، ويرفع هذا الجسم إلى مستوى أعلى من مستواه الأصلي فإنه يُبذلُ عليه شغل يُختزن فيه على شكل طاقة ( طاقة وضع ) ، ويمكن استرجاع هذا الشغل عند سقوط الجسم إلى مستواه الأصلي .

هناك أشكال متعددة من القوى في الطبيعة مثل قوة المرونة وقوة الجاذبية وقوة الرياح والقوى المائية وغيرها . وجميع هذه القوى قادرة على إنجاز شغل .

#### ١ - ٥ - ٢ الطاقة والقدرة ووحدات القياس :

تُعرف القدرة بأنها معدل الطاقة المبذولة ( الشغل المبذول ) في وحدة الزمن  $( P = dE / dt )$  . وفي النظام العالمي المعياري للوحدات ( SI ) يقاس كل من الشغل والطاقة بوحدة الجول ( J ) أو مضاعفات هذه الوحدة مثل الكيلوجول  $( 1000 \text{ J} = \text{KJ} )$  . ولأغراض الفيزياء النووية هناك وحدة صغيرة جداً للشغل أو الطاقة هي الإلكترون فولت  $( 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = \text{eV} )$  . ويُعبر عن الطاقة أحياناً بوحدة القدرة والزمن مثل وحدة الواط - ساعة  $( \text{W.h} )$  أو الكيلواط - ساعة  $( 3.6 \times 10^6 \text{ J} = \text{KW.hr} )$  .

أما وحدة القياس الأساسية للقدرة في النظام العالمي فهي الواط (W) ومضاعفات هذه الوحدة هي : الكيلوواط (  $KW = 1000 W$  ) ، والميغاواط (  $MW = 10^6 W$  ) ، والجيجاواط (  $GW = 10^9 W$  ) ، والنتراواط (  $TW = 10^{12} W$  ) .

ويعبر عن القدرة أيضاً بوحدة الحصان (hp) وفي النظام العالمي فإن الحصان يساوي ٧٢٥ واط (  $1hp = 735 W$  ) . ويمكن التعبير عن القدرة أحياناً بوحدة الطاقة والزمن مثل الجول في الثانية (  $J / s$  ) أو الكيلوجول في الثانية (  $KJ / s$  ) .

### ١ - ٣ - أشكال الطاقة :

هناك شكلان رئيسان للطاقة هما الطاقة الانتقالية ( Transitional ) والطاقة المخزنة ( Stored ) . فالطاقة الانتقالية هي طاقة متحركة يمكنها الانتقال عبر حدود نظام مثلاً ، كما هو الحال بالنسبة للطاقة الحرارية ، والطاقة المخزنة تتوافر على شكل كتلة كالوقود ( طاقة كيميائية ) أو موقع في مجال قوة كجسم في مجال الجاذبية الأرضية ( طاقة وضع ) .

من الممكن تحويل الطاقة المخزنة بسهولة إلى أحد أشكال الطاقة الانتقالية . وبشكل عام يمكن حصر أشكال الطاقة المختلفة في ست مجموعات أساسية هي الطاقة الميكانيكية والطاقة الكهربائية والطاقة الكهرومغناطيسية والطاقة الكيميائية والطاقة النووية والطاقة الحرارية .

في علم الديناميكا الحرارية ( التيرموديناميكا ) تعرف الطاقة الميكانيكية بأنها الطاقة التي يمكن استخدامها لرفع وزن معين . ويعرف الشكل الانتقالي للطاقة الميكانيكية بالشغل ، ويمكن تخزين هذه الطاقة كطاقة وضع أو طاقة حركية ، فطاقة الوضع هي الطاقة التي تمتلكها المادة أو الكتلة نتيجة لوجودها في مجال قوة ، كالطاقة التي يمتلكها جسم يرتفع عن سطح الأرض مسافة معينة نتيجة لوجوده في مجال الجاذبية الأرضية ، أو الطاقة المصاحبة لغاز مضغوط ، أو الطاقة التي يمتلكها جسم حديدومغناطيسي كالحديد أو النيكل نتيجة لوجوده في مجال مغناطيسي ، أو طاقة المرونة المخزنة في زنبرك مضغوط . أما طاقة الحركة فهي الطاقة التي تمتلكها كتلة من المادة نتيجة لحركتها بالنسبة لجسم ( مرجح ) آخر ، والحدافة أو عجلة التماير ( Flywheel ) تعتبر مثالاً لنظام

يخزن الطاقة الميكانيكية على شكل طاقة حركة . إن الطاقة الميكانيكية هي شكل مفيد جداً من أشكال الطاقة لأنه يمكن تحويلها بسهولة وكفاءة عالية إلى أشكال أخرى للطاقة .

الطاقة الكهربائية هي الطاقة المصاحبة لتدفق الإلكترونات أو تجمع هذه الإلكترونات . وتقاس هذه الطاقة عادة بوحدة القدرة والزمن كوحدة الواط — ساعة ( Watt hours ) أو الكيلواط — ساعة ( Kilo Watt hours ) ، والشكل الانتقالي للطاقة الكهربائية هو عبارة عن تدفق للإلكترونات وغالباً على شكل تيار كهربائي في موصل معدني . ويمكن تخزين الطاقة الكهربائية كطاقة مجال كهروستاتيكي ( Electrostatic-Field ) أو طاقة مجال حثي ( Inductive-Field ) ، فطاقة المجال الكهروستاتيكي هي الطاقة المصاحبة لمجال كهربائي ناتج عن تجمع للشحنات ( الإلكترونات ) على صفائح مكثف ( Capacitor ) وطاقة المجال الحثي — تسمى أحياناً بطاقة المجال الكهرومغناطيسي — هي الطاقة المصاحبة لمجال مغناطيسي ناتج عن مرور تيار كهربائي في ملف حثي .

والطاقة الكهربائية كالتطبيقات الميكانيكية تعتبر شكلاً مرغوباً به لأنه يمكن تحويلها بسهولة وكفاءة إلى أشكال أخرى من الطاقة .

الطاقة الكهرومغناطيسية هي الطاقة المصاحبة للإشعاع الكهرومغناطيسي وتقاس هذه الطاقة بوحدة الإلكترون — فولت ( eV ) أو الميغا إلكترون — فولت ( MeV ) .

وتعتبر هذه الطاقة شكلاً نقياً للطاقة حيث أنه لا يصاحبها أي كتلة وتتوافر على شكل طاقة انتقالية فقط ، تنتقل بسرعة الضوء . وتحسب الطاقة المتوافرة في الأمواج الكهرومغناطيسية من المعادلة :

$$E = h f = \frac{hc}{\lambda} \quad (٧ - ١)$$

حيث :

$E$  : طاقة الأمواج ( J ) ،

$h$  : ثابت بلانك (  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s ) ،

$f$  : التردد مقاساً بوحدة الهرتز ( Hz ) ،

$\lambda$  : طول الموجة ( m ) .

c : سرعة الضوء ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) .

نجد من هذه المعادلة أن الطاقة الموجية تتناسب طردياً مع تردد الموجة وعكسياً مع طول هذه الموجة . وهناك أنواع متعددة للإشعاع الكهرومغناطيسي تعتمد على طول الأمواج أو طبيعة المصدر المشع . وتعتبر أشعة جاما ( Gamma ) واحدة من أكثر أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية امتلاكاً للطاقة . وأغلب هذه الأشعة تبعث من أنوية الذرات . والإشعاع الحراري هو إشعاع كهرومغناطيسي ينتج عن اهتزاز الذرات . ونطاق الإشعاع الكهرومغناطيسي الحراري واسع ، ويشمل الإشعاع ذو درجة الحرارة العالية أو الأشعة فوق البنفسجية ( Ultra violet ) والنطاق الضيق للأشعة المرئية ( Visible radiation ) ونطاق الإشعاع ذو درجة الحرارة المنخفضة أو الأشعة تحت الحمراء ( Infra red ) . ويلي الإشعاع الحراري في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي ( انظر الشكل ( ١ - ٥ ) ) أشعة الميكرويف والمليميترويف المستعملة في أفران الميكرويف والرادار ( Radar ) . أما أشعة أمواج الراديو ( Radio wave ) فإنها تحتل الطرف الأيسر ( طول الموجة الأكبر ) من طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي كما هو مبين في الشكل ( ١ - ٥ ) .

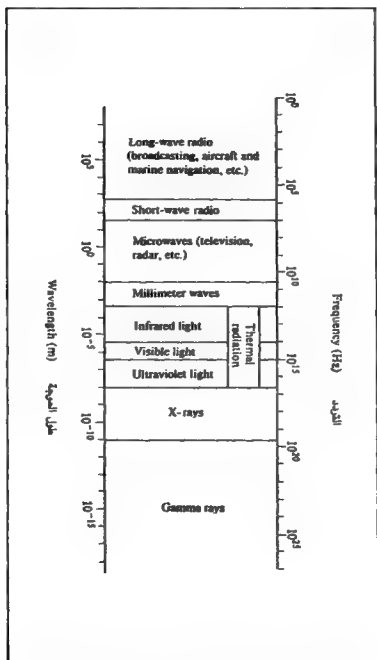
الطاقة الكيميائية هي الطاقة المحركة ( المتحركة ) نتيجة لتفاعل ذرتين أو أكثر أو جزيئين أو أكثر أو خليط منها لتتحد مع بعضها لإنتاج مركب كيميائي أكثر ثباتاً .

وتوجد الطاقة الكيميائية على شكل طاقة مخزنة فقط ، ويسمى التفاعل الذي يطلق الحرارة بالتفاعل الطارد للحرارة ( Extho thermic reaction ) . وفي بعض التفاعلات الكيميائية يتم امتصاص الحرارة ، وتسمى هذه التفاعلات بالتفاعلات الماصة للحرارة ( Endothermic reactions ) ويعتبر الاحتراق — والذي هو تفاعل كيميائي طارد للحرارة — أكثر مصادر طاقة الوقود أهمية للجنس البشري .

الطاقة النووية هي نوع آخر من الطاقة الموجودة على شكل طاقة مخزنة فقط ، ويتم تحرير هذه الطاقة خلال التفاعلات النووية المختلفة ، وتقلس الطاقة المحركة من التفاعل النووي عادة بالمعيار إلكترون — فولت ( Mev ) لكل تفاعل .

ويشكل علم هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات النووية وتشمل الانحلال

الطيف (a - 1)  
مخطط الترددات الكهرومغناطيسية





أو الاضمحلال الإشعاعي ( Radiative decay ) ، والانشطار النووي ( Fission ) ، والاندماج النووي ( Fusion ) .

الشكل الأخير من أشكال الطاقة هو الطاقة الحرارية المصاحبة لاهتزازات الذرات والجزيئات للمادة، وتعتبر الطاقة الحرارية شكلاً ملمسياً من أشكال الطاقة من حيث انه بالإمكان تحويل كافة أشكال الطاقة الأخرى بشكل كامل إلى طاقة حرارية في حين أن العملية العكسية يحدها القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بشكل كبير .

والشكل الانتقالي للطاقة الحرارية هو الحرارة ( Heat ) ، ويمكن تخزين الطاقة الحرارية في معظم المواد على شكل حرارة محسوسة ( Sensible heat ) أو حرارة كامنة ( Latent heat ) .

## مصادر الطاقة

## ١ - ٦ - ١ مقدمة:

بالإمكان تصنيف مصادر الطاقة إلى فئتين عامتين :

١ — الطاقة السماوية ( الفضائية ) أو الطاقة القادمة من خارج نطاق الكرة الأرضية ، وهي الطاقة التي تصل إلى الأرض من الفضاء الخارجي. وتشمل هذه الطاقة جميع المصادر التي يمكن أن تزود الأرض بالطاقة من الفضاء الخارجي. وتتضمن هذه المصادر الطاقة الكهرومغناطيسية وطاقة الجاذبية وطاقة الجسيمات من النجوم والقمر والكواكب بالإضافة إلى طاقة الوضع للنيازك التي تدخل الغلاف الغازي للكرة الأرضية .

في الواقع فإن هناك مصدرين فقط من مصادر الطاقة الفضائية يستفاد منهما فعلاً في إنتاج أشكال أخرى من الطاقة، وهما الطاقة الكهرومغناطيسية من شمس كرتنا الأرضية وتسمى بالطاقة الشمسية المباشرة وطاقة الجاذبية للقمر التي تسبب حدوث ظاهرتي المد والجزر في البحار والمحيطات . إن مصادر الطاقة الفضائية جديدة بالاستغلال بأكبر قدر ممكن لكونها مصادر طاقة مستمرة غير قابلة للنضوب أو الفناء ولأنها غير ملوثة للبيئة نسبياً، وهذا اعتبار هام جداً كما سنرى فيما بعد .

٢ — الطاقة المتوافرة ( Capital ) على سطح الأرض أو في باطن الأرض . تعد الطاقة الكيميائية المتوافرة في وقود المستحاثات ( نفط وغاز طبيعي وفحم حجري ) — والتي يتم تحريوها في تفاعل كيميائي ( احتراق ) — المصدر الرئيس من مصادر الطاقة المتوافرة. يلعبها في الأهمية الطاقة النووية التي يتم

تحويرها نتيجة لتفاعل نووي يتحول فيه جزء من كتلة الأنوية المتفاعلة إلى طاقة حسب معادلة أينشتاين (Einstein) .  
وتعتبر الطاقة الحرارية الجوفية (Geothermal energy) إحدى المصادر الهامة والرئيسية من مصادر الطاقة المتوفرة، وتوجد هذه الطاقة في مصائد تحت وفي القشرة الأرضية الصلبة على شكل بخار وماء حار وصخور حارة .

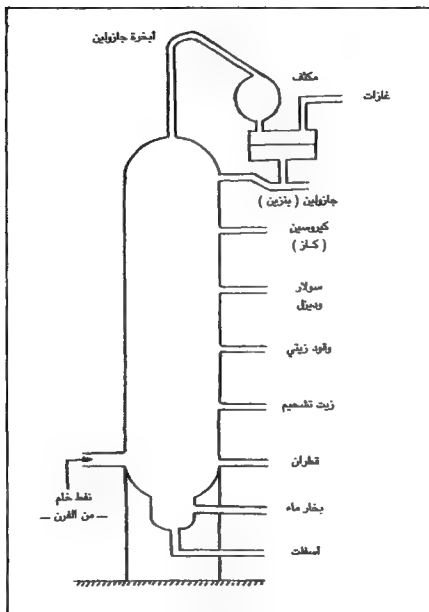
#### ١ - ٦ - ٧ وقود المستحاثات : ( Fossil fuels )

يمكن تصنيف وقود المستحاثات عموماً إلى ثلاث فئات رئيسية، هي الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي، وهناك أنواع أخرى من وقود المستحاثات أقل أهمية من هذه الفئات الرئيسية مثل الزيت الصخري (Shale oil) ورمال القار الزيتي (Tar-sand oil) . وجميع هذه الأنواع نتجت عن تحجر (Fossilization) المركبات الهيدروكربونية ذات الصيغة الكيميائية العامة  $C_x (H_2O)_y$  والتي تكونت أساساً في عملية التركيب أو التمثيل الضوئي (Photosynthesis) في النباتات حيث تحولت الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية .

يسود الاعتقاد بأن معظم وقود المستحاثات تكونت قبل حوالي ٣٢٥ مليون سنة من كربوهيدرات النباتات الميتة التي تحولت بفعل الضغط والحرارة وغياب الأكسجين إلى مركبات هيدروكربونية لها الصيغة الكيميائية العامة  $C_x H_x$  ، ولهذا السبب فإن جميع وقود المستحاثات تتكون من مركبات هيدروكربونية ، بشكل أساسي .

#### ١ — النفط : ( Petroleum )

هناك نظريتان تفسران تكون البترول في باطن الأرض، هما النظرية العضوية والنظرية اللاعضوية. ويرى أصحاب النظرية الأولى أن النفط عبارة عن مواد هيدروكربونية مزيجة نتجت عن تحلل مواد عضوية نباتية أو حيوانية بفعل الضغط والحرارة في باطن الأرض. وأغلب هؤلاء يرون بأن النفط يعود إلى تحلل بقايا كائنات بحرية مثل الجمبري والاسكبادوريا والقشريات والصدفيات والمحاريات، والأقلية الباقية ترى أن النفط هو بقايا كائنات عضوية نباتية مختلفة . أما أصحاب النظرية



الشكل (١-٦)  
برج تقطير النفط الخام

اللاعضوية فإنهم يرون أن النفط عبارة عن مواد هيدروكربونية نتجت عن تفاعل مركب كبريد الحديد ( لحد مكونات القشرة الأرضية ) مع بخار الماء حيث أدى هذا التفاعل إلى تكون مادة شبيهة بالاستيلين تحولت إلى نقط خام بمرور الزمن .

يؤيد أغلب المختصين النظرية العضوية الحيوانية ويوردون أدلة على صحة اعتقادهم مثل احتواء النفط على مادتي النيتروجين والبالافين واللوتين لا توجدان إلا في بقايا الكائنات الحية النباتية والحيوانية .

يوجد النفط في فراغات ( فجوات ) ضخمة في الصخور الرسوبية . ويصنف النفط الخام عادةً إلى ثلاث فئات بالاعتماد على ما يتبقى منه بعد تقطير المركبات الخفيفة ، هي النفط الخام ذو القاعدة البارافينية ( Paraffin - based crudes ) والنفط الخام ذو القاعدة الاسفلتية ( Asphalt - based crudes ) والنفط الخام ذو القاعدة المختلطة . يتكون النفط الخام من نسب وزنية متفاوتة لعدة عناصر هي الكربون ( ٨٤ — ٨٧ ٪ ) والهيدروجين ( ١١ — ١٦ ٪ ) والأكسجين والنيتروجين ( صفر — ٧ ٪ ) والكبريت ( صفر — ٤ ٪ ) .

على الرغم من اكتشاف البترول منذ زمن طويل — ١٨٥٩م — إلا أن ابراج التقطير لفصل مكونات البترول عن بعضها لم تُستعمل إلا في بداية هذا القرن . وتعتمد عملية التقطير الجزئي للنفط أساساً على أنه مزيج من عدد كبير من مركبات هيدروكربونية ذات نقاط غليان مختلفة يمكن فصلها بعضها عن بعض باختلاف درجات الحرارة ، حيث يمكن الحصول على المواد ذات القابلية الأعلى للتطاير عند درجات حرارة منخفضة أكثر ، مما يؤدي إلى انفصال المركبات المختلفة للنفط عن بعضها في برج التقطير — كما هو مبين في الشكل ( ١ - ٦ ) — حسب درجات الحرارة التي تزداد كلما اتجهنا إلى الأسفل .

يعتبر الجازولين ( البنزين ) من أهم المنتجات النفطية اللازمة لوسائط النقل المختلفة . ولهذا تم تطوير طرق جديدة لزيادة نسبة الجازولين المستخرجة من النفط الخام عن النسبة الطبيعية الموجودة والبالغة ٢٠ ٪ من وزنه . من هذه الطرق ما يسمى بطريقة التكسير وفيها تتحلل الجزيئات الكبيرة إلى جزيئات أخرى أصغر وأخف ، وبذلك يمكن إنتاج الجازولين من الكيروسين ( الكاز ) والوقود الزيتي ( Fuel oil ) وقد تتم هذه العملية بفعل الضغط والحرارة وتسمى بالتقطيل الحراري ( Pyrolysis ) أو بفعل العوامل المساعدة ( Catalytic cracking ) حيث أمكن بذلك زيادة نسبة الجازولين المنتجة من النفط الخام إلى ٤٥ ٪ .

يحتل النفط في وقتنا الحاضر المرتبة الاولى من بين مصادر الطاقة الاخرى في العالم من حيث نسبة الاستهلاك. وتتزايد هذه النسبة بمعدل اكبر من غيرها كما هو مبين في الجدول ( ١ - ٤ ) .

مصدر الطاقة	نسبة مساهمة المصدر من إجمالي مصادر الطاقة %		
	١٩٧٨	١٩٧٥	١٩٧٣
نفط	٤٤	٤٣,٩	٤٥,٨
غاز طبيعي	١٨	١٨	١٧,٨
فحم حجري	٣٠	٣٠,٧	٣٠,٤
طاقة كهرومائية	٦,٤	٥,٩	٥,٢
طاقة نووية	١,٦	١,٥	٠,٩
المجموع	١٠٠	١٠٠	١٠٠

الجدول ( ١ - ٤ )  
تطور الأهمية النسبية لاستهلاك مصادر الطاقة عالمياً

من أهم نواحي استعمالات النفط ما يلي :

- ١ — استخدام الكيروسين ( الكاز ) في عمليات التسخين المنزلية والطهو والإضاءة واستعمال الاقتور والاقتاج في محركات الطائرات النفاثة .
- ٢ — استخدام الجازولين ( Gasoline ) في محركات السيارات .
- ٣ — استخدام الديزل ( Diesel ) والوقود الزيتي ( Fuel - oil ) في القطارات والبواخر والمصانع ..
- ٤ — استخدام مختلف مركبات النفط في الآلات الزراعية .
- ٥ — استخدام النفط في صناعات الورق والمنسوجات والمطاط الصناعي والالياف الصناعية والمفرعات، بالإضافة إلى بعض الصناعات الغذائية، واستخدامه لاستخلاص بعض المبيدات الكيميائية. وكذلك استخلاص زيوت التشحيم ومادة الفازلين المستعملة في صناعات المستحضرات الطبية ومستحضرات التجميل. ويستخلص منه أيضاً

شمع البارافين الذي تصنع منه الشموع ، بالإضافة إلى استخلاص الجليسيرين والأسيتون والكحول الميثيلي من الغازات الناتجة عن عملية التقطير .

٦ - نحصل من النفط على مادة الإسفلت المستخدمة في تعبيد الطرق .

للنفط خصائص عديدة من أهمها القيمة الحرارية والجاذبية النوعية ونقطة الوميض ( Flash point ) ونقطة الانصهار ( Pour point ) ، وتقاس القيمة الحرارية أو المحتوى الحراري بوحدة ( KJ / kg ) . وتعرف الجاذبية النوعية للسائل بأنها كثافة هذا السائل مقسومة على كثافة الماء عند درجة حرارة ١٥,٦° س ( س = درجة مئوية ) .

وتعرف نقطة الوميض للوقود السائل بأنها أقل درجة حرارة للسائل يكون عندها بخار الوقود المتولد فوق سطح السائل قابلاً للاشتعال ( Will Just ignite ) وعند درجة حرارة أعلى منها بقليل ( تسمى نقطة الاشتعال Fire point ) فإن بخار الوقود المتولد يشتمل وتبدأ عملية الاحتراق للوقود . وتصرف نقطة الانصهار لأحدى مشتقات النفط بأنها أقل درجة حرارة للمشتقة النفطية تبدأ عندها عملية السيالان ( Flow ) لهذه المشتقة .

يمتاز النفط عن الفحم الحجري بأنه أسهل في المناولة ( Handling ) والخبز والنقل وأسهل في عملية الحرق ولا يخلف احتراقه سوى كمية قليلة من الرماد مقارنة بالفحم الحجري ، وهناك بعض المشاكل في عملية حرق النفط ، فعلى الرغم من أن نسبة الكبريت قليلة إلا أن عملية التخلص منها صعبة . وهناك أنواع من النفط الخام ذات محتوى لا بأس به من الكبريت والتي تُنتج أكسيد الكبريت الملوث للجو عند حرقها ، بالإضافة إلى تفاعل هذه الأكاسيد مع بخار الماء لإنتاج حامض الكبريتيك الذي يؤدي إلى تآكل وإتراء المواد الحديدية كما هو الحال في عوادم السيارات . وهناك أيضاً مشكلة احتواء بعض الأنواع على عنصر الفاناديوم ( V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ) الذي ينتج أكسيد الفاناديوم خلال الاحتراق ومن ضمنها خامس أكسيد الفاناديوم ( V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ) الذي يتسبب في حدوث تآكل سريع للمواد الحديدية الموجودة في معظم المراحل .

بلغ الاحتياطي العالمي المؤكد ( المعروف ) من النفط لعام ١٩٧٩م حوالي ٦٤٢ بليون برميل ، تساهم دول الأوك بحوالي ٣٤٢ بليون برميل من هذا

الاحتياطي، وقد قدر احتياطي المملكة العربية السعودية لوحدها عام ١٩٧٩م بحوالي ٢٠٠ بليون برميل أي ما يعادل حوالي ٤٦,٧ ٪ من الاحتياطي العالمي، في حين يزيد الاحتياطي العربي الكلي عن ٦٠ ٪ من الاحتياطي العالمي .

## ٢ — الفحم الحجري ( Coal )

يُعتقد أن الفحم الحجري يعود لأصل نباتي حيث لزمّت طبقة من المواد النباتية سمكها عشرون قدماً لتكوين طبقة من الفحم الحجري سمكها قدم واحد . ولقد تحولت هذه البقايا النباتية بفعل الهواء وتحت التأثير المشترك للضغط ودرجة الحرارة المرتفعين في باطن الأرض إلى مادة الخث ( Peat ) التي هي عبارة عن وقود من درجة واطئة ( Low - grade fuel ) ، ومن ثم تحولت هذه المادة إلى الفحم الحجري البني ( Brown coal ) ، ثم إلى فحم الليجنايت ( Lignite ) ، ثم إلى الفحم شبه القاري ( Subbituminous ) ، ثم إلى الفحم القاري ( Bituminous ) ، وأخيراً إلى فحم الأنثراسايت ( Anthracite coal ) .

وقد رافق عمليات التحول هذه زيادة في صلابة الفحم ونقص في محتواه من الأكسجين والهيدروجين والرطوبة وزيادة في محتواه من الكربون .

يوجد الفحم الحجري على شكل طبقات ( Seams ) في القشرة الأرضية . وهناك تباين كبير في سماكات هذه الطبقات والتي تقل في بعض المناطق عن ٣٠ سنتيمتراً في حين تصل في بعض المناطق إلى حوالي ١٢٠ متراً كما هو الحال في فوشون ( Fushun ) بـمنشوريا ( Manchuria ) ، ويصنف الفحم الحجري بعدة طرق منها طريقة الجمعية الأمريكية لفحص المواد ( ASTM ) التي تصنف الفحم إلى أربع فئات رئيسية تبعاً لمرورها — زمن تكوينها — وهذه الفئات هي :

## ١ — الفحم الأنثراسيقي ( Anthracitic )

ويعرف أيضاً بالفحم الصلب، إذ أنه أكثر أنواع الفحم صلابة وجودة ودرجة الاشتعال لهذا الفحم مرتفعة، وعند احتراقه فإنه لا يخلف سوى القليل من الرماد ويتميز بلونه الأسود الفلمق ، ويوجد هذا الفحم عادةً على عمق كبير، ولهذا فإن تكاليف استخراجها عالية. ولا يستعمل هذا الفحم في الصناعة إلا على نطاق محدود لأنه أقل أنواع الفحم توافراً. وينقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات :



( أ ) الميتا لئتراسايت ( Meta Anthracite ) تبلغ نسبة الكربون فيه ٩٨ ٪ أو أكثر، بينما تبلغ نسبة المواد المتطايرة ( Volatile matter ) فيه ٢ ٪ أو أقل، وهذا النوع لا يتكتل ( Non agglomerating ) .

( ب ) الانثراسايت ( Anthracite ) تتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٩٢ — ٩٨ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ٢ — ٨ ٪، وهذا النوع لا يتكتل .

( ج ) شبه الانثراسايت ( Semianthracite ) تتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٨٦ — ٩٢ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ٨ — ١٤ ٪ وهو لا يتكتل أيضاً .

٢ — الفحم القاري (البيتوميضي) : ( Bituminous )  
أكثر أنواع الفحم انتشاراً ويعرف أيضاً بالفحم اللين ( Soft )، وهو سهل الاحتراق ويغطي لهباً أصفر اللون عند حرقه. وأون هذا الفحم أسود ولا يتشقق عند تعرضه للهواء. ينقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات ثانوية تبعاً لنسبة الكربون الموجودة فيه — جميعها لا تتكتل في العادة — :

( أ ) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة المنخفضة، وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٧٨ — ٨٦ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ١٤ — ٢٢ ٪

( ب ) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة المتوسطة، وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٦٩ — ٧٨ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ٢٢ — ٣١ ٪

( ج ) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة العالية، تبلغ نسبة الكربون فيه ٦٩ ٪ أو أقل، في حين تبلغ نسبة المواد المتطايرة ٣١ ٪ أو أقل ، وتتراوح قيمته الحرارية بين ٢٤٤٠٠ — ٢٢٦٠٠ كيلوجول / كغم. وتنقسم هذه المجموعة أيضاً إلى ثلاث مجموعات إضافية حسب القيم الحرارية للفحم .

### ٣ — الفحم شبه القاري : ( Subbituminous )

في حين يستخدم الفحم القاري في صناعة الحديد والصلب وذلك بعد تحويله إلى فحم الكوك — الذي يعتبر المصدر الرئيس للحرارة اللازمة لصهر المعادن — فإن الفحم شبه القاري — الذي يمكن اعتباره نوعاً سيئاً من الفحم القاري — يستخدم في إنتاج الغازات. كما تستخلص من عملية تقطيره مشتقات هامة تدخل في الكثير من الصناعات مثل صناعة الأصباغ والمطاط والأحماض والاسمدة وغيرها . ويقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات ثانوية تبعاً لقيمتها الحرارية. هي الفحم شبه القاري A والفحم شبه القاري B والفحم شبه القاري C. والقيم الحرارية لهذه المجموعات الثلاث على الترتيب تتراوح ما بين ( ٢٤٤٢٠ — ٢٦٧٥٠ ) و ( ٢٢٠٩٠ — ٢٤٤٢٠ ) و ( ١٩٣٠٠ — ٢٢٠٩٠ ) كيلوجول / كغم.

### ٤ — فحم الليجنايت : ( Lignite )

ويسمى أيضاً الفحم الأسمر، وهو من الأنواع الصلبة وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٦٠ — ٧٥ ٪ ويصطي عند حرقه بنسب عالية من الدخان والشوائب المتطايرة، وهو ذو قيمة أو محتوى حراري منخفض مقارنة بالأنواع الأخرى. لذلك فإنه يعتبر من الأنواع الرتيبة ذات الاستعمال المحدود. وينقسم هذا النوع إلى مجموعتين ثانويتين تبعاً للقيمة الحرارية وهي: فحم الليجنايت A الذي تتراوح قيمته الحرارية ما بين ١٤٦٥٠ — ١٩٣٠٠ كيلوجول / كغم وفحم الليجنايت B الذي تقل قيمته الحرارية عن ١٤٦٥٠ كيلوجول / كغم.

### طرق تحليل الفحم ( Coal analyses )

هناك طريقتان أساسيتان تستعملان لتحليل الفحم الحجري وكلا الطريقتين تعطيان النسب الكتلية ( الوزنية ) لمكونات الفحم بعد استبعاد محتوياته من الرطوبة ( فحم جاف Moisture - free ) والرماد ( Ash - free ) وهما التحليل التقريبي والتحليل النهائي ، ولكنه يلزم تحويل هذه التحليلات لكي تشمل نسب الرطوبة والرماد عند إجراء حسابات الاحتراق والمناولة للفحم. وتسمى التحليلات الناتجة عن عملية التحويل هذه بتحليلات الفحم عند الحرق ( As - burned ) وعند الاستلام ( As - received ) .

## ١ - التحليل التقريبي : ( Proximate analysis )

تعتبر هذه الطريقة أبسط طريقة لتحليل الفحم وهي تعطي النسب الكتلية لكل من الكربون الثابت ( FC ) والمادة المتطايرة ( VM ) والرطوبة ( M ) والرماد ( A ) في الفحم . يتم هذا التحليل بأخذ عينة من الفحم المسحوق وتوزن بعناية وتسخن إلى درجة حرارة ١١٠° س لمدة ٢٠ دقيقة ، ثم يُعاد توزيع العينة فتكون نسبة الكتلة للرطوبة هي النقص في الوزن بعد التسخين مقسوماً على الوزن الأصلي . ويسخن ما تبقى من العينة إلى درجة حرارة ٩٥٤° س في وعاء مغلق لمدة سبع دقائق وتوزن العينة في نهاية هذه المدة، فتكون نسبة الكتلة للمادة المتطايرة مساوية للنقص في الوزن مقسوماً على الوزن الأصلي ، وأخيراً يتم تسخين العينة إلى درجة حرارة ٧٢٢° س في بوتقة مفتوحة حتى تحترق تماماً ، ثم يتم بعد ذلك توزيع ما تبقى من العينة، فتكون نسبة الرماد في العينة مساوية للوزن النهائي مقسوماً على الوزن الأصلي . ويمكن حساب نسبة الكربون الثابت في العينة بطرح نسب كل من الرطوبة والمادة المتطايرة والرماد من الواحد الصحيح . وبالإضافة إلى نسب الكربون الثابت والمادة المتطايرة والرطوبة والرماد فإن التحليل التقريبي يعطي أيضاً النسبة الكتلية للكبريت ( S ) والقيمة الحرارية العليا ( HHV ) للفحم بشكل منفصل .

## ٢ - التحليل النهائي : ( Ultimate analysis )

وهذا التحليل هو تحليل مخبري ويعطي نسب الكتلة لكل من الكربون ( C ) والهيدروجين ( H<sub>2</sub> ) والأكسجين ( O<sub>2</sub> ) والكبريت ( S ) والنيتروجين ( N<sub>2</sub> ) في الفحم مع القيمة الحرارية العليا للفحم . ومعظم التحليلات النهائية تبين نسب الرماد والرطوبة بشكل منفصل ولكن بعضها يدمج هذه النسب مع نسب الأكسجين والهيدروجين . تستعمل نتائج التحليل النهائي في حساب كمية الهواء المطلوبة لنظام احتراق معين وبالتالي تحديد حجم نظام السحب أو الشفط للفرن .

## خصائص الفحم الحجري :

هناك عدد من الخصائص أو الصفات التي يجب مراعاتها عند اختيار نوع معين من الفحم في تطبيق عملي معين أهمها :

#### ١ — محتواه من الكبريت :

يعتبر الكبريت أحد العناصر القليلة للاحتراق في الفحم الحجري، وينتج عن احتراقه غاز ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) الذي يعتبر أحد الملوثات الرئيسية للبيئة . وتعد عملية إزالة الكبريت من الفحم قبل حرقه عملية صعبة ومكلفة . كذلك فإن عملية إزالة ثاني أكسيد الكبريت من نواتج الاحتراق تعد هي الأخرى عملية صعبة، ولهذا فإنه من الضروري أن يكون المحتوى الكبريتي أقل ما يمكن ( ١ ٪ أو أقل ) .

#### ٢ — خصائصه احتراقه :

عند اختيار نوع من الفحم لنظام احتراق معين فإنه يجب مراعاة الكيفية التي يتم فيها إحراق هذا الفحم ، فإذا كان حرق الفحم يتم على فرش ثابت فإنه يجب استعمال فحم قابل للاحتراق الحر ( Free-burning coal ) وليس فحمًا قابلاً للتكتل ( Caking coal ) ، لأن فحم الاحتراق الحر يميل للتبخر والتناثر عند اشتعاله مما يؤدي إلى تعريض الفحم غير المشتعل لهواء الاحتراق فيؤدي إلى تسهيل وتسريع عملية الاحتراق ، ولكن في حالة حرق الفحم القابل للتكتل فإن ذلك يؤدي إلى اندماج الفحم المحترق في كتلة واحدة وهذا بدوره يتسبب في عدم احتراق نسبة كبيرة من الكربون النظيف في الفحم ، وبمثل هذا النوع من الفحم يستخدم عادة لإنتاج فحم الكوك ( Coke ) ، وإحرقه بكفاءة يستخدم فرش يمكن تحريكه أو هزّه ميكانيكياً لتحطيم وتكسير الفحم المتكتل .

#### ٣ — مقاومته لظروف الطقس : ( Weatherability )

تحدد هذه الخاصية مقدرة الفحم على مقاومة ظروف الطقس المتغيرة وذلك من خلال عدم حدوث ثلثت زائد للفحم عند تعرضه لمثل هذه الظروف . في محطات التوليد الكبيرة التي تعمل بالفحم الحجري يتم تخزين الفحم في أكوام كبيرة بجانب هذه المحطات حيث أنه عند وصول الفحم إلى أماكن التخزين هذه — بواسطة القطارات أو غيرها من وسائل النقل — فإنه يتم نشره على شكل طبقات رقيقة ورصّه بواسطة آلات ضخمة للتخلص من أكبر كمية ممكنة من الهواء الموجود في أكوام الفحم للتقليل من خطر حدوث الاشتعال الذاتي في هذه الأكوام . وإذا كان الفحم قابلاً للثقلت بسهولة فإن هذا يؤدي إلى تآكل أو تحكّ الجزيئات الصغيرة بفعل العواصف المطرية مما يتسبب في خسائر مادية وفوائد طاقة كبيرة بالإضافة إلى تلوث المياه .

#### ٤ — قابلية الطحن ( Grindability )

يستخدم الفحم المطحون في الكثير من أنظمة حرق الفحم الحجري خصوصاً أفران الفحم المسحوق حيث يتم طحن الفحم للحصول على مسحوق فائق النعومة بواسطة آلات طحن خاصة ( Pulverizers ) تتناقص قدرتها بازدياد قابلية الفحم للطحن .

#### ٥ — درجة حرارة تليين الرماد : ( Ash-softening temperature )

هي درجة الحرارة التي يصبح عندها رماد الفحم ذا درجة عالية من اللدانة ( Very plastic ) وهذه الدرجة تقل قليلاً عن درجة حرارة انصهار الرماد . في الأفران التي يتم التخلص من الرماد فيها على شكل جُفاء ( Slag ) مُنصهر ، يُفضل أن يكون الرماد ذا درجة حرارة تليين منخفضة في حين يفضل استخدام الرماد ذي درجة حرارة التليين المرتفعة في أنظمة الاحتراق التي تتعامل مع الرماد كمادة صلبة .

#### ٦ — القيمة ( المحتوى ) الحرارية : ( Heating value )

تُعد هذه الخاصية ذات أهمية كبيرة إذ أنها تمثل مقدار الطاقة الكيميائية المخزنة في كتلة أو حجم معين من الوقود ( الفحم ) ، وتقاس عادة بوحدة الكيلوجول لكل كيلوغرام ( KJ / kg ) . هناك قيمتان حراريتان للفحم هما : القيمة الحرارية العليا أو الإجمالية ( HHV ) والقيمة الحرارية الدنيا أو الصافية ( LHV ) ، والفرق بين القيمتين هو الحرارة الكامنة للتبخّر الموجودة في بخار الماء المطروح مع الغازات العادمة والنتاج عن عملية الاحتراق بالإضافة للماء ( الرطوبة ) الموجود في الفحم أصلاً ( قبل حرقه ) ويستثنى من ذلك أي رطوبة قد تدخل مع هواء الاحتراق .

وحيث أن الحرارة الكامنة لتبخّر الماء تبلغ حوالي ٢٤٠٠ كيلوجول / كغم فإنه يمكن حساب إحدى القيمتين من الأخرى بواسطة المعادلة التقريبية ( يمكن استعمالها لأي وقود آخر غير الفحم ) الآتية :

$$HHV - LHV = 2400 ( M + 9 H_2 ) \text{ KJ / kg} \quad ( ٧ - ١ )$$

حيث أن ( M ) و ( H<sub>2</sub> ) هما النسب الوزنية للرطوبة والهيدروجين في الوقود .

### ٣ — الغاز الطبيعي : ( Natural Gas )

يعتبر الغاز الطبيعي من أهم مصادر الوقود الغازي ويوجد في الطبيعة تحت سطح الأرض إما مختلطاً مع النفط أو منفرداً بالقرب من حقول النفط أو منفرداً بعيداً عن حقول النفط أو داخل طبقات الفحم الحجري في مكامن داخل الطبقات الصخرية. ويتراوح ضغط الغاز الطبيعي في مكامن وجوده ما بين ٢٥٠ — ٧٠٠ بار (  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N / m}^2$  ) .

يتكون الغاز الطبيعي من خليط من المركبات الغازية ، أهمها : للميثان ( Methane  $\text{CH}_4$  ) بنسبة تتراوح ما بين ٧٠ — ٩٥ ٪ ، والإيثان ( Ethane  $\text{C}_2 \text{H}_6$  ) بنسبة تصل إلى حوالي ١٧ ٪ ، والبروبان ( Propane  $\text{C}_3 \text{H}_8$  ) والبيوتان ( Butane  $\text{C}_4 \text{H}_{10}$  ) بنسب أقل .  
للغاز الطبيعي عدة ميزات تجعل منه مصدراً هاماً من مصادر الطاقة من أبرزها :

١ — قيمته الحرارية العالية والبالغة حوالي ٥٥٨٠٠ كيلوجول / كغم ( ٣٧٠٠٠ كيلوجول / متر مكعب عند ضغط جوي ١ ودرجة حرارة ٢٠°س ) .

٢ — سهولة حرقه واختلاطه مع الهواء بشكل جيد .

٣ — يعطي احتراقاً كاملاً ونظيفاً مع القليل من الرماد .

٤ — سهولة استعمله ونقله حيث يمكن إيصاله لليوت في أنابيب لاستخدامه في إنتاج الطاقة الحرارية. كذلك بالإمكان نقله في أنابيب عبر البحار أو شحنه في ناقلات مبردة ( Cryogenic ) بعد إسالته وتحويله إلى غاز طبيعي مسال ( LNG ) عند درجة حرارة — ١٢٧°س ) .

العيب الوحيد للغاز الطبيعي كمصدر للطاقة هو أنه من الصعب تخزينه بكميات كبيرة بحالته الغازية. وهناك بعض الشركات التي تقوم بحقن الغاز تحت ضغط عالٍ في فجوات ضخمة تحت الأرض حيث يحل هذا الغاز محل الماء الموجود في هذه الفجوات .

هناك عدد كبير من الغازات المصنعة ، منها : غاز النفط المسال

( Liquefied petroleum gas, LPG ) ويطلق عليه أحياناً اسم غاز المصفاة . ويتكون هذا الغاز من المركبات الخفيفة الناتجة في برج تقطير النفط وهي البروبان ( Propane ) والبيوتان ( Butane ) بشكل أساسي . وهذا الغاز يعتبر ذا قيمة حرارية حجمية أعلى من القيمة الحرارية للحجمية للغاز الطبيعي وذلك لأن الوزن الجزيئي والكثافة له أكبر . وغاز النفط المسال له كثافة أكبر من تلك التي للهواء الجوي مما يزيد من خطورة تناولته بالمقارنة مع الغاز الطبيعي .

ويتم عادة نقل هذا الغاز وتخزينه تحت ضغوط تتراوح ما بين ٤ - ٢٠ بار وذلك حسب درجة حرارة الجو . ومن الغازات المصنعة أيضاً غاز الماء ( Water gas ) والذي يتم إنتاجه بتمرير كل من بخار الماء والهواء بالتناوب خلال فرش من فحم الكوك المتوهج حيث يتفاعل البخار مع فحم الكوك وينتج عن هذا التفاعل غاز الهيدروجين وغاز أول أكسيد الكربون .

وتضاف أحياناً أبخرة بعض الزيوت إلى غاز الماء لرفع قيمته الحرارية ويسمى غاز الوقود الناتج عن هذه العملية بـغاز الماء الممزوج ( Carbureted water gas ) .

وهناك عدد من العمليات التحويلية التي يتم تطويرها لتصنيع وقود غازي ذي قيمة حرارية عالية من الفحم الحجري، وهذا الغاز يطلق عليه اسم الغاز الطبيعي المصنع ( Synthetic natural gas SNG ) . نظرياً ، فإن هذه العمليات تجعل من الممكن الاستفادة من الفحم الحجري ذي المحتوى العالي من الكبريت وذلك بتحويل معظم طاقته إلى وقود غازي رخيص ونظيف، ولكنه يلزم إضافة الهيدروجين إلى الفحم قبل عمليات التحويل هذه لأن المركبات الهيدروكربونية الصلبة الموجودة في الفحم تعتبر ذات نسبة هيدروجين / كربون منخفضة مقارنة مع هذه النسبة للوقود الغازي . وفي عملية الهدرجة ( Hydrogenation ) يتفاعل الهيدروجين عالي الضغط بدرجة حرارة ٩٠٠° س مع الفحم لإنتاج عدد من المركبات الهيدروكربونية الخفيفة خصوصاً الميثان .

ومن الغازات المصنعة كذلك غاز المنتج ( Producer gas ) ويتم تحضير هذا الغاز بصرق طبقات بعض أنواع الفحم الحجري ( من درجة واطئة Low-grade coal ) في الأرض أو في مواقع وجوبها مع كمية غير كافية من الهواء إلى أن يحترق جميع الفحم تماماً .

وفي هذا الاحتراق تضاف كمية من الهواء تكفي فقط للمحافظة على درجة حرارة الاحتراق عند حد معين كافٍ لسحب بعض الهيدروجين وأكسدة بعض الكربون إلى أول أكسيد الكربون. وعلى الرغم من أن الوقود الغازي الناتج عن هذه العملية ذو جودة منخفضة إلا أنه يعتبر استثماراً جيداً لهذه الطبقات الرديئة والقليلة الصعك من الفحم الحجري التي تعد عملية استخراجها غير مجدية من الناحية الاقتصادية .

وهناك غاز الفرن العالي ( Blast-furnace gas ) منخفض الجودة والذي هو عبارة عن ناتج ثانوي في عمليات تصنيع الفولاذ . ويتم إنتاج هذا الغاز بواسطة حرق الفحم في هواء غير كاف ثم يمرر الغاز المتولد فوق المعدن المنصهر لمنع حدوث تأكسد لهذا المعدن ( يكون هذا الغاز عبارة عن عامل مختزل Reducing agent ) .

وعلى الرغم من أن القيمة الحرارية لغاز الفرن العالي لا تتعدى عشر هذه القيمة للغاز الطبيعي فإنه يتم إنتاج كميات كبيرة منه في هذه الأفران بشكل اقتصادي .

ويتكون هذا الغاز بشكل أساسي من النيتروجين وأول أكسيد الكربون وثنائي أكسيد الكربون، حيث أن أول أكسيد الكربون هو المكون الوحيد القابل للاحتراق في هذا الغاز .

وأخيراً هناك غاز المجاري ( Sewage gas ) الذي ينصب الاهتمام حالياً على إنتاجه بالاستفادة من مخلفات الميوانات والخسروات. ويتكون هذا الغاز أساساً من الميثان المتولد خلال عملية تحلل ( Decay ) المواد العضوية .

ازدادت أهمية الغاز الطبيعي كمصدر للطاقة حيث ازدادت نسبة ما يساهم به هذا الغاز عام ١٩٥٠م من ١٢ ٪ من طاقة العالم الكلية إلى حوالي ١٩ ٪ عام ١٩٨٠م .

يتراوح الاحتياطي العالمي المؤكد من الغاز الطبيعي حسب التقديرات في نهاية عام ١٩٧٥م ما بين  $٥٨ \times ١٢١٠ - ٧١ \times ١٢١٠$  متر مكعب ، شُكِّل الاحتياطي العربي حوالي ١٦,٥ ٪ منه .



### ١ - ٦ - ٣ الطاقة الجيوفيزيائية :

#### ١ - الطاقة المائية:

تشمل هذه الطاقة كلاً من الطاقة الكهرومائية بطاقة الأمواج، ويمكن الحصول على الطاقة الكهرومائية باستغلال القوة الكامنة في مساقط المياه الطبيعية ( الشلالات ) أو الصناعية مثل السدود ، والطاقة المتوافرة من هذا المصدر ميزات منها :

١ - إنها طاقة متجددة وليست معرضة للفناء طالما هناك أمطار وتلوج تتساقط بانتظام .

٢ - إن الطاقة الكهريائية المتولدة من قوة اندفاع المياه تمتاز بما يلي :

- ( أ ) سهولة التحكم بها حسب الحاجة .
  - ( ب ) سرعة النقل والتوزيع .
  - ( ج ) نظافتها المطلقة ( لا تلوث البيئة ) .
  - ( د ) الكفاءة العالية في تحويلها من طاقة وضغ إلى طاقة كهريائية حيث تصل هذه الكفاءة إلى حوالي ٩٠ ٪ .
  - ( هـ ) المحطات الكهرومائية تعمر طويلاً ( يصل عمرها إلى ٢٠٠ سنة ) .
- وحاجتها للصيانة قليلة وذلك لفلة الاعطال في الاتنها ولا تحتاج لعدد كبير من الأيدي العاملة للإشراف عليها وصيانتها بالإضافة إلى أن هذه المحطات تخدم أغراضاً أخرى غير إنتاج الطاقة الكهريائية مثل توفير مياه الري والمياه اللازمة لتربية الأسماك .

وهناك سيئات منها :

- ( أ ) تكاليف الإنشاء الباهظة ( السدود وخطوط نقل الكهرباء ... ) .
- ( ب ) الكهرباء غير قليلة للتخزين بشكل اقتصادي .
- ( ج ) لا يمكن نقل الكهرباء مسافة تزيد عن ١٠٠٠ كم بشكل اقتصادي .

أما طاقة الأمواج، فهي غير مستقلة وهناك بعض البحوث والمقترحات لاستغلال هذه الطاقة ، حيث جرى استخدام فكرتين : الأولى

تستخدم الحركة الراسية للأمواج وتسمى بالأنبوب الفلطف، حيث يتم استخدام أنبوب يقطس ٧٥ ٪ من طوله في الماء وهناك صمامات تسمح بإدخال الماء من أسفل الأنبوب ثم تطلق، وخلال حركة الماء للأعلى في الأنبوب يمر خلال توربينات تولد الطاقة الكهربائية ثم يخرج الماء من فتحة تكون خارج سطح الماء وتعتمد قوة سير الماء وبالتالي الطاقة الكهربائية المتولدة على قوة الأمواج . أما الفكرة الثانية فإنها تستغل حركة الامتزاز التي تولدها الأمواج باستخدام نوع من البندول أو العوامة حيث يستفاد من الحركة الترددية للذراع المتصلة بهذه العوامة وذلك بتحويلها إلى شكل مفيد من أشكال الطاقة . وتقدر الطاقة التي يمكن أن تولدها الأمواج في العالم بحوالي  $6 \times 10^6$  واط .

وهناك أيضاً طريقة أخرى للحصول على الطاقة الكهربائية بشكل غير مباشر من مياه المحيطات، وذلك بالاستفادة من الاختلاف في درجات الحرارة على أعماق مختلفة في هذه المحيطات حيث أنه بالإمكان توليد القدرة بالاستفادة من الحرارة المتوافرة في الطبقات السطحية لمياه المحيط ( المصدر الساخن ) وطرد الحرارة إلى الطبقات الباردة نسبياً في الأسفل ( المصب البارد ) .

ويطلق على هذا المصدر المتجدد للطاقة، اسم طاقة المحيط الحرارية ( Ocean Thermal Energy OTE ) .

## ٢ — طاقة الرياح : ( Wind energy )

استطاع الإنسان تمخير طاقة الرياح منذ أمد بعيد لأغراض مختلفة وقد جرى استخدامها في البحر لتسيير السفن وفي البر لتشغيل الطواحين الهوائية .

تنشأ حركة الرياح من تأثير مزيج لتسخين أشعة الشمس ودوران الأرض حول نفسها . وتتوافر الطاقة في الرياح على شكل طاقة حركة

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho A v^3 J \quad (A-1)$$

حيث :

KE : طاقة الحركة للرياح ( J )

m : كتلة الرياح ( kg )

v : سرعة الرياح ( m / s )

ρ : كثافة الهواء ( kg / m<sup>3</sup> )

A : المساحة التي تتحرك فيها شفرات المروحة الهوائية ( Swept area m<sup>2</sup> )

على الرغم من أن الطاقة الكامنة في الريح عظيمة إلا أن هناك سلبيات كثيرة تمنع استغلالها على نطاق واسع أهمها :

١ - التذبذب الكبير في سرعة الرياح مما يؤثر على التوربين ( الطاحونة الهوائية ) .

٢ - تنصف هذه الطاقة بعدم الديمومة في معظم المناطق .

٣ - تكون كثافة الهواء قليلة فإن هذا يعني أن الطاقة المتوفرة في حجم معين من الهواء قليلة ويتطلب ذلك معدات ذات مساحة وحجم كبيرين لاستغلال هذه الطاقة .

وتقدر الطاقة المتوفرة في الرياح في العالم بحوالي ١٧٠ × ١٠<sup>١٠</sup> واط .

٣ - الطاقة الشمسية : ( Solar energy )

تعتبر الطاقة الشمسية مصدر كل الطاقات التقليدية المعروفة ( باستثناء الطاقة النووية ) وهي مصدر لا ينضب للطاقة ، وتستقبل الأرض من الشمس كمية من الطاقة مقدارها ١٨١٠ كيلواط - ساعة في العام . وهذه الكمية تساوي ألف ضعف احتياطي البترول في العالم . في الوقت الحاضر لا يتم استغلال هذه الطاقة كمصدر أساسي من مصادر الطاقة إلا أن هناك بحثاً متزايدة للتوسع في استغلالها خصوصاً في توليد الطاقة الميكانيكية . والمشاكل الرئيسة التي تعترض استغلال الطاقة الشمسية بشكل واسع تنلخص فيما يلي :

١ - تعتبر مصدراً متقطعاً للطاقة على المدى اليومي ( ليل - نهار ) وعلى المدى الفصلي ( صيف - شتاء )

٢ - نظراً لانخفاض شدة الإشعاع الشمسي فإن هذا يتطلب لواقط ومجمعات شمسية ذات مساحات ولحجام كبيرة مما يزيد من التكاليف .

٣ - يحتاج استغلالها إلى تكنولوجيا متقدمة لا تتوافر للدول كافة .

#### ٤ - صموية تخزين الطاقة الشمسية .

ولكن الميزات العديدة لهذا المصدر من الطاقة يجعلها من المصادر المرغوبة، ومن أهم هذه الميزات:

- ١ - تشكل الطاقة الشمسية مصدراً مثلاً للطاقة المتجددة .
- ٢ - يمكن الاعتماد عليها بسبب ديمومتها واستمراريتها .
- ٣ - مصدر مجاني للطاقة .
- ٤ - مصدر طاقة نظيف أي أنها لا تلوث البيئة .
- ٥ - إمكانية تحويلها إلى أشكال أخرى للطاقة بسهولة .
- ٦ - تشكل مصدراً مستقلاً للطاقة ولايست بحاجة للاستيراد من بلد آخر .

#### ١ - ٦ - ٤ الطاقة الحرارية الجوفية : ( Geothermal energy )

توجد هذه الطاقة على شكل تراكبات طبيعية من بخار الماء والماء الحار والصخور الجافة الحارة .

هناك انتقال حرارة طبيعي من قلب الكرة الأرضية المنصهر إلى سطح الكرة الأرضية عبر طبقات الأرض المختلفة، وفعلياً فإن جميع هذه الحرارة تنتقل بالتوصيل ، ( Conduction ) وفي بعض الأماكن فإن كميات محدودة من الماء أو البخار تتساق إلى سطح الأرض عبر شقوق أو صدوع في طبقات الأرض على شكل نوافير غازية ( Pumaroles ) أو نوافير حارة ( Geysers ) أو ينابيع حارة ( Hot springs ) وفورات بركانية، ولكن مثل هذه الأماكن نادرة الوجود ولهذا فإنه لا بد من حفر الآبار في أغلب الأحيان لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية .

يبلغ الانحدار الطبيعي لدرجة الحرارة ( Normal temperature gradient ) في التركيب الصخري للأرض حوالي ٢٩° س / كيلومتر ( 29C° / Km ) وانحدار بهذا المقدار يعتبر غير كافٍ للاستغلال العملي للطاقة الداخلية للأرض. وفي بعض الأماكن يصل هذا الانحدار في درجة الحرارة إلى أكثر من ١١٠° س / كيلومتر ( 110C° / Km ) مما يجعل من الممكن استغلال الطاقة الحرارية في هذه الأماكن . الشكلان الأساسيان للطاقة الحرارية الجوفية

هما الماء الحار والمصخور الحارة الجافة ( Hot dry rock ) وفي بعض الأماكن تسود الحالة البخارية في منطقة الماء الحار ويعرف مصدر الطاقة في هذه الحالة بالمصدر البخاري ( Steam ) وإذا كان الماء الحار للمصدر كاملاً في حالته السائلة ، فإن المصدر يسمى بالمصدر الحراري المائي الجوفي ( Geohydrothermal ) .

تم استغلال الطاقة الحرارية الجوفية منذ فترة طويلة في مناطق مختلفة من العالم كما هو الحال في لارديريلو ( Larderello ) في إيطاليا حيث حفر هناك بئر لاستغلال البخار الجوفي عام ١٩٠٤م تحصل قدرته الكهربائية إلى ٢٧٠ ميغاواط ( 370 MWe ) . يبين الشكل ( ١ - ٧ ) رسماً تخطيطياً لنظام طاقة حرارية جوفية .

يعتبر بعض المختصين الطاقة الحرارية الجوفية طاقة ملوثة إلى حد ما حيث ان بعض المصادر تطلق غازات ذات نشاط إشعاعي بالإضافة إلى غاز سولفيد الهيدروجين (  $H_2S$  ) الذي هو غاز سام .

وهناك مشكلة أخرى مصاحبة لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية وهي مشكلة التلوث الحراري ( Thermal pollution ) الناتج عن ضخ كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للبيئة مما يخل بالتوازن البيئي كما سنرى فيما بعد .

ومن المشاكل الهامة أيضاً لهذا المصدر هي احتمال هبوط الأرض وتصدعها وزيادة النشاط الزلزالي في منطقة استغلال الطاقة الجوفية .

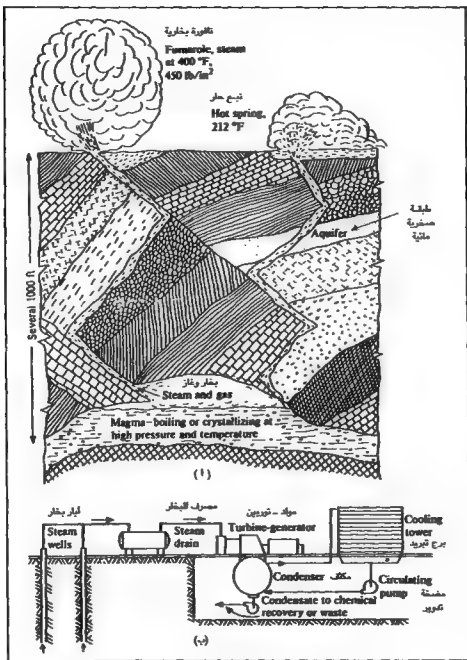
تقدر الطاقة الحرارية الجوفية الكلية التي يمكن استغلالها في العالم بحوالي  $4 \times 10^{21}$  جول .

## ١ - ٦ - ٥ الطاقة النووية : ( Nuclear energy )

تعتبر الطاقة النووية للمصدر الوحيد من مصادر الطاقة التقليدية التي ليس مصدرها الأساسي الطاقة الشمسية، ويرجع تاريخ اكتشافها إلى أربعة عقود مضت، وتعد مصدراً مثلاً للطاقة إذا تم استغلاله بشكل واسع حيث أن مقدار الطاقة المتولدة من التفاعلات النووية يعطي بمعاملة أينشتاين:

$$E = mc^2 J$$

( ١ - ٩ )



الشكل (١ - ٧)   
 رسم تخطيطي لتراكم حراري جوفي طبيعي ومحطة طاقة نموذجية

حيث ان :

E : الطاقة المتولدة ( J )

m : الكتلة الفعلية المتحولة إلى طاقة ( kg )

C : سرعة الضوء (  $3 \times 10^8$  m / s )

هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات النووية المعروفة وهي :

١ - التحلل الإشعاعي (الإضمحلال) :

هنا يتحول النظير المشع عبر فترة زمنية طويلة إلى عناصر أخرى أكثر ثباتاً وتنطلق خلال هذه العملية جسيمات  $\alpha$  ( ألفا ) و  $\beta$  ( بيتا ) وأشعة  $\gamma$  ( جاما ) .

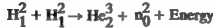
٢ - الانشطار النووي :

وفيه يتم انشطار نواة الذرة إلى نواتين أو أكثر أخف وزناً والفرق في الكتلة يتحول لطاقة حسب معادلة اينشتاين كما هو الحال في القنبلة الذرية. ومن الأمثلة على هذا النوع من التفاعل هو انشطار نظير اليورانيوم  $^{235}_{92}\text{U}$  عند قذفه بنيوترون إلى نواتين لمنصرين جديدين هما الباريوم ( Ba ) والكريبتون ( Kr ) ويكون مجموع الكتلتين الجديدتين أقل من الكتلة الأصلية .



٣ - الاندماج النووي :

في هذا التفاعل تندمج عدة أنوية خفيفة لتشكل نواة واحدة أخف وزناً والفرق في الكتلة يتحول لطاقة. ومن الأمثلة على هذا التفاعل هو اندماج نواتين من الديتيريوم ( Deuterium ) ( هيدروجين - 2 ) أو الهيدروجين الثقيل  $\text{H}^2_1$  لتكوين ذرة هيليوم  $\text{He}$  بنيوترون n . ويحتاج هذا التفاعل (الاندماج) - لكي يتم - درجة حرارة مقدارها  $10^8 \times 10^8$  كلفن .



وتعد القنبلة الهيدروجينية تطبيقاً لهذا النوع من التفاعلات الاندماجية.

هناك عدة مميزات للاندماج النووي مقارنة بالانشطار النووي :

( ١ ) هناك احتياطات أكبر في العالم من النظائر القابلة للاندماج ( وقود الاندماج النووي ) من احتياطات وقود الانشطار النووي.

فالهدروجين الثقيل ( Hydrogen - 2 ) او الديتيريوم يوجد في الطبيعة بنسبة ١ / ٦٧٠٠ من الهيدروجين العادي .

( ب ) ان نواتج الاندماج النووي ليست ذات مستويات إشعاعية كنواتج الانشطار النووي فهي ذات إشعاعية أقل وإذالك فإنها أقل خطراً على البيئة والناس .

( ج ) إن الاندماج النووي هو تفاعل يحتاج إلى عملية بدء غالية في الصعوبة وكذلك فإنّه من الصعب أيضاً إبقائه مستمراً ولهذا فإن أي تغيير بسيط في ظروف التفاعل يوقفه رأساً مما يعمل على منع حدوث خطر في حالة حدوث خلل فني في المفاعل النووي .

( د ) إن الطاقة المتولدة من الاندماج النووي اكبر منها بكثير في حالة الانشطار النووي .

وبشكل عام فإن هناك عدة مشاكل تعترض استخدام الطاقة النووية بشكل واسع منها :

( ١ ) التكاليف الباهظة لإنشاء المحطات والمفاعلات النووية .

( ب ) الحاجة إلى توافر الخبرة الفنية العالية والمدرية .

( ج ) مخاطر البصاوت وتلوث البيئة ومشكلة التخلص من النفايات النووية .

( د ) صعوبة الحصول على الوقود الذري ( في حالة الانشطار النووي فإن الوقود هو اليورانيوم المُضَع ) .

يقدر احتياطي العالم من نظير اليورانيوم  $^{235}\text{U}$  بحوالي  $12,7 \times 2110$  جول ومن نظير اليورانيوم  $^{238}\text{U}$  بحوالي  $1800 \times 2110$  جول ومن الديتيريوم  $(\text{H}_2^2)$  او الهيدروجين الثقيل بحوالي  $600 \times 2210$  جول وهناك احتياطات أخرى هائلة من عناصر مشعة أخرى .



## ١ - ٦ - طاقة المد والجزر : ( Tidal energy )

تُعطى حركة المد والجزر في المحيطات كمية كبيرة جداً من طاقة الحركة التي يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية بواسطة توربينات مائية . وتعد طاقة المد والجزر إحدى مصادر الطاقة القائمة من خارج نطاق الكرة الأرضية إذ أنها تعود بشكل أساسي إلى قوة جذب القمر للأرض، حيث تؤثر هذه القوة القمرية على المحيطات وتتسبب في السرعات المدية باتجاه الشواطئ والتي يتراوح ارتفاعها من أجزاء من المتر إلى ثمانية أو تسعة أمتار . إن استغلال هذا المصدر من الطاقة ليس من الأمور السهلة وذلك للأسباب التالية :

١ - يتطلب بناء محطة كهربائية وصول مياه المد إلى ارتفاع عشرة أمتار وهذا لا يتوافر إلا في عدد محدود من خلجان العالم .

٢ - التذبذب الكبير في مستوى مياه المد العالي .

٣ - اتجاه حركتي المد والجزر المتمكستين مما يؤدي إلى صعوبة في تصميم التوربينات .

٤ - صعوبة بناء المحطات المدنية بسبب الصعوبات الجغرافية والطبيعية .

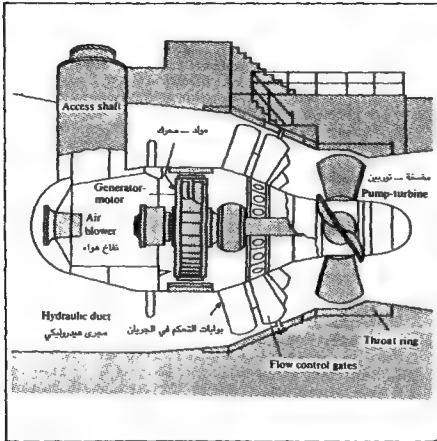
٥ - انخفاض معدل التشغيل السنوي لهذه المحطات .

على الرغم من أن استغلال طاقة المد والجزر على نطاق واسع لا يقدم حلاً لمشكلة احتياجات العالم من الطاقة فإن هذا المصدر يعد من المصادر الهامة والمرغوبة لتكون طاقة متجددة ( غير قابلة للفناء ) وغير ملوثة للبيئة .

ومن أهم المحطات المدنية في العالم تلك التي بناها الفرنسيون عند مصب نهرانسن، وتعمل هذه المحطة أربعمائة وعشرين ساعة في اليوم وتولد ما مقداره ٢٤٠ ميغاطا من الكهرباء ، أي ما يعادل حوالي ٤ ٪ من الطاقة الكهربائية في فرنسا .

وتقدر القدرة الموجودة في حركة المد والجزر في العالم بحوالي  $1210 \times 8$  كيلواط .

يبين الشكل ( ١ - ٦ ) إحدى الوحدات الانعكاسية ( تعمل كتوربين أو مضخة ) المستخدمة في المحطة المدنية على نهر رانسن بفرنسا .



الشكل ( ٩-١ )  
إحدى وحدات ( توربين - مضخة ) المستخدمة  
في محطة رأس المدية لتوليد الطاقة الكهربائية

#### ١-٦-٦-١ عمل محطات الطاقة المدية : (Tidal power plant operation )

في محطة للطاقة المدية يتم تحويل طاقة الوضع للماء إلى طاقة ميكانيكية ( تتحول إلى طاقة كهربائية ) خلال مرور الماء في توربينات مدنية معدة لهذه المحطات .

ويعتمد عمل المحطة المائية على بناء حاجز ( Barrier ) لتخزين مياه المد في حوض ( Basin ) خلف هذا الحاجز عند حدوث المد وتقريبه عند حدوث الجزر .

ويتم توليد الطاقة الكهربائية عند مرور الماء عبر توربينات خلال حركتي المد والجزر إلى الحوض ، ويمتلئ الحوض ويفرغ من الماء خلال دورة مدية كاملة يستغرق حدوثها ١٢ ساعة و ٢٥,٥ دقيقة .

حجم الماء الداخل للحوض خلال حركة المد

$$V = A \Delta Z \quad (١٠ - ١)$$

حيث :

A : مساحة الحوض المتوسطة (  $m^2$  )

$\Delta Z$  : ارتفاع مياه المد ( m )

حجم الماء المتدفق عبر التوربين في دورة مدية كاملة ( مد + جزر )

$$V_{cycle} = 2 A \Delta Z \quad (١١ - ١)$$

معدل تدفق الماء  $m$  ( kg/s )

$$m = \frac{2 \rho A \Delta Z}{T} \quad (١٢ - ١)$$

حيث :

$\rho$  : كثافة الماء (  $kg/m^3$  )

$T$  : زمن الدورة المدية الكاملة (  $T_{cycle} = 12.425 \text{ hours}$  )

ويؤخذ اللو المتوسط العامل على التوربين مساوياً لـ (  $\Delta Z/2$  ) ، أما القدرة النظرية القصوى المعذلة ( Theoretical maximum average power المتولدة في المحطة المدية فتعطى بالمعادلة :

$$P_{max} = \frac{\rho A g (\Delta Z)^2}{T} \quad (١٣ - ١)$$

ولكن القدرة الفعلية المتولدة من المحطات المدية تكون أقل بكثير من القدرة النظرية القصوى، ويعود ذلك أساساً إلى أن الطول الفعّال العامل يكون أقل من الطول المتوسط (  $\Delta Z/2$  ) ولهذا فإن التوربينات المدية تصمم لكي تكون قادرة على العمل بفعالية تحت قيم منخفضة لعلو الماء .

ويتم عادة حساب القدرة السنوية المعدلة القصوى ( Annual average maximum power ) للمحطة المدية وذلك بالتعويض عن  $\Delta Z$  في المعادلة ( ١٢-١ ) بقيمتها السنوية المتوسطة . أما القدرة الفعلية المعدلة المتولدة من المحطة المدية فتكون عبارة عن حاصل ضرب القدرة القصوى المعدلة ومعامل التشغيل السنوي للمحطة والذي تبلغ قيمته حوالى ( 0.11 ) للمحطات ذات التأثير المفرد ( Single - effect operation ) وحوالى ( 0.13 ) للمحطات ذات التأثير الثنائي ( Double - acting operation ) أي المحطات التي تولد القدرة في حركتي المد والجزر .

مثال :

تبلغ المساحة المتوسطة لحوض محطة مدية ٧٠ سم<sup>٢</sup> ومعدل ارتفاع مياه المد السنوي ١٠ م ومعامل التشغيل السنوي للمحطة ٠.١٢ ، احسب معدل إنتاج القدرة السنوي لهذه المحطة .

$$P_{\max} = \frac{\rho A g (\Delta Z)^2}{T} \quad P_{\max} \text{ القدرة النظرية القصوى}$$

$$= \frac{1025 (70 \times 10^6) 9.81 \times (10)^2}{12.425}$$

$$= 5.665 \times 10^{12} \text{ J/h ( جول / ساعة )}$$

$$= 5.665 \times 10^{12} \frac{\text{J}}{\text{h}} \times \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} \times 10^{-6}$$

$$= 1573.6 \text{ MW ( ميغاطوات )}$$

١٣

القدرة الفعلية المعنلة  $P_a$

$$P_a = f P_{\max}$$

$$= 0.12 \times 1573.6 = 188.8 \text{ MW}$$

• • •



**الفصل الثاني**  
**مبادئ تحويل الطاقة**



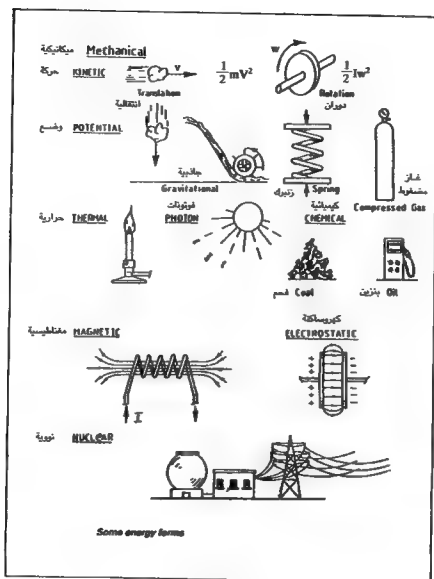


## ٢ - ١

### اعتبارات عامة في تحويل الطاقة

واحد من الأمثلة السهلة على الطاقة هو الجهد المطلوب لرفع كتلة من مستوى منخفض إلى مستوى أعلى . وعمل ذلك ، فإنه من الضروري استخدام قوة أكبر يقلل من القوة المؤثرة إلى أسفل على هذه الكتلة ( قوة الجاذبية ) ، فالشغل المبذول في رفع هذا الجسم يساوي الكسب أو الزيادة في طاقة الوضع لهذا الجسم في مجال الجاذبية الأرضية . ويمكن استعادة هذا الشغل بترك الجسم يسقط من المستوى العالي إلى المستوى المنخفض . ومن الأمثلة الأخرى لطاقة الوضع ، طاقة المرونة المخزنة في زنبرك عند شده أو انضغاطه . ومن الأشكال الأخرى للطاقة الميكانيكية طاقة الحركة .

وتعرف الطاقة بأنها القابلية لعمل أو إنجاز شغل . يبين الشكل ( ٢ - ١ ) أشكالاً متعددة للطاقة .



الشكل ( ٢ - ١ )  
بعض أشكال الطاقة

## ٢ - ٢

### مبدأ حفظ الطاقة القانون الأول في الترموديناميك

ينص مبدأ حفظ الطاقة ( القانون الأول في الترموديناميك ) - على أن مجموع الطاقات من كافة الأشكال في نظام مغلق يبقى ثابتاً .

فيذا حدثت عملية في نظام مغلق أدت إلى زيادة في أحد أشكال الطاقة ، فإن هذا يعني أن اشكالا أخرى للطاقة في النظام سوف تنقص أو تقل بنفس المقدار .

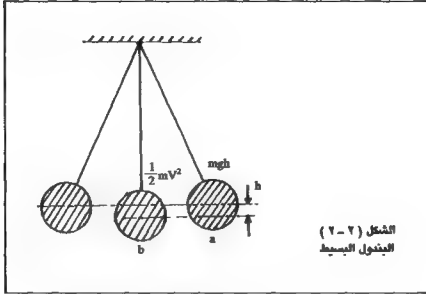
مثال :

في حالة البندول البسيط المبين في الشكل ( ٢ - ٢ ) ، فإن طاقة الوضع تكون أكبر ما يمكن في الوضع ( a ) وتساوي ( mgh ) ، وتكون طاقة الحركة في هذا الوضع صفراً . وعند تحرك البندول باتجاه الوضع ( b ) ، تزداد طاقة الحركة تدريجياً على حساب النقصان في طاقة الوضع بحيث يبقى مجموعهما ثابتاً ، وعند الوضع ( b ) يصل البندول إلى أقصى سرعة له ، وتصبح طاقة حركته  $(\frac{1}{2}mv^2)$  وطاقة وضعه صفراً . وهكذا يتم تبادل أشكال الطاقة في هذا النظام .

وفي الديناميكا الحرارية ( الترموديناميك ) ، فإن القانون الأول ينص على ما يلي :

عندما يُنفَّذ النظام عملية مغلقة ، فإن الشغل المنجز يتناسب مع كمية الحرارة المنتقلة .

يفسر القانون الأول طبيعة العلاقة بين الحرارة المنتقلة والشغل المنجز في



آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية مغلقة ، ورياضياً ، فإن هذا القانون يُكتب على النحو الآتي :

$$\Delta U = Q - W \quad (٢-١)$$

حيث :

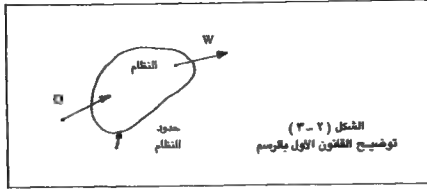
$\Delta U$  : التغير في الطاقة الداخلية للنظام ( J ) .

$W$  : الشغل الذي ينجزه النظام ( J ) .

$Q$  : الحرارة المنتقلة عبر حدود النظام ( J ) .

يبين الشكل ( ٢ - ٢ ) توضيحاً بالرسم للقانون الأول .

إن القانون الأول يبين لنا بأن الشغل الموجب الذي تنتجه آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية يزداد مع زيادة الحرارة المنتقلة من المحيط الخارجي ( حرارة موجبة ) ، وتعرّف الكفاءة الحرارية لهذه الآلة بأنها مقدار الشغل الموجب الذي ينجزه النظام مقسوماً على الحرارة المضافة — عبر حدود هذا النظام — من المصدر الخارجي :



$$\eta_{th} = \frac{W_n}{Q_{in}} \quad ( ٢ - ٢ )$$

وهكذا نجد أن القانون الأول يحدد مقدار الشغل ( الطاقة المفيدة ) الذي يمكن الحصول عليه من مصدر الطاقة الخارجي المتوافر: كثافة الوقود الكيميائية ( نحم ، بنزول ... ) أو طاقة الماء أو طاقة الرياح .

#### ٢ - ٢ - ١ تطبيقات على القانون الأول :

يبين الشكل ( ٢ - ٤ ) نظاماً تيرموديناميكياً بسيطاً ومعزولاً (  $Q = 0$  ) يتم فيه نقل الطاقة ( تحويل الطاقة ) بواسطة الشغل ، حيث يتم إنجاز الشغل عند تحرك المكبس مسافة مقدارها (  $ds$  ) ، ويعطي هذا الشغل بالمعادلة الآتية :

$$dW = p A ds \quad ( ٢ - ٢ )$$

حيث :

$dW$  : كمية الشغل التفاضلية المنجزة (  $J$  ) .

$A$  : مساحة المكبس (  $m^2$  ) .

$ds$  : المسافة التفاضلية التي يتحركها المكبس (  $m$  ) .

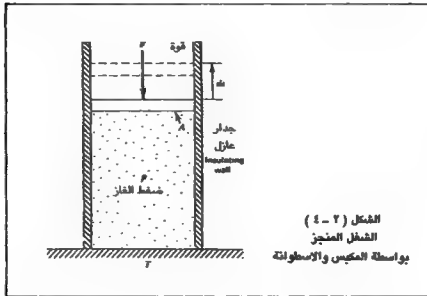
$p$  : ضغط الغاز في الاسطوانة ،  $P = F / A$  , (  $N / m^2$  ) .

ويمكن كتابة المعادلة ( ٢ - ٢ ) بالطريقة الآتية :

$$dW = p dV \quad ( ٢ - ٤ )$$

حيث :

$dV$  : الحجم المزاح التفاضلي (  $m^3$  ) .



وفي حالة التغير المصغر من حجم ابتدائي (  $V_1$  ) إلى حجم نهائي (  $V_2$  ) ، فإن كمية الشغل المنجز :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV \quad ( ٢ - ٥ )$$

حيث أنه بالإمكان إيجاد قيمة (  $W$  ) من المعادلة ( ٢ - ٥ ) إذا تم تحديد العلاقة بين الضغط (  $P$  ) والحجم (  $V$  ) . ويكون الشغل المنجز موجِباً ( الشغل المنجز

بواسطة النظام ) إذا كان  $(V_2 > V_1)$  ويكون الشغل سالباً ( الشغل مبذول على النظام ) . إذا كان  $(V_1 > V_2)$  .

مثال :

افترض أن  $(p = K / V)$  احسب قيمة  $(W)$  من المعادلة  $(\gamma - 5)$  عند تحرك المكبس من الحجم  $(V_1)$  إلى الحجم  $(V_2)$  .

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{K}{V} dV$$

$$W = k \ln V \Big|_{V_1}^{V_2} = k \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$

لاحظ أن اللوغاريتم الطبيعي  $(\ln)$  لعدد أقل من ١ يكون سالباً . مما يعني أنه في حالة كون  $(V_2 < V_1)$  ، فإن الشغل المنجز يكون سالباً .

مثال :

في الشكل  $(\gamma - 4)$  ، قطر المكبس هو ١٠ سم ، فإذا تحرك هذا المكبس مسافة ٤ سم ، فما هو مقدار التغير في حجم الاسطوانة ؟ إذا كانت الإزاحة الحاصلة تعود لتأثير قوة خارجية مقدارها ١٠٠٠٠ نيوتن ، فما هو مقدار الشغل المنجز ؟ وما هو مقدار الضغط داخل الاسطوانة ؟

$$\Delta V = V_2 - V_1 = A \Delta s$$

$$= \frac{\pi \times 10^2}{4} \text{ cm}^2 \times 4 \text{ cm}$$

$$= 314.2 \text{ cm}^3$$

$$= 3.142 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$W = F \cdot \Delta s = 10^4 \times 0.04 = 4 \times 10^2 \text{ J}$$

$$W = p \Delta V, P = \frac{W}{\Delta V}$$

$$P = \frac{4 \times 10^2}{3.142 \times 10^{-4}}$$

$$= 1.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{أيضاً :}$$

$$P = \frac{10^4}{\frac{\pi (0.1)^2}{4}}$$

$$= 1.3 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

**مثال :**

في نظام ثيرموديناميكي كانت كمية الحرارة المنتقلة من المحيط الخارجي إلى النظام ( 40 KJ ) ، والمثل الذي ينجزه النظام هو ( 45000 J ) . احسب مقدار الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام . وفي إجراء لخريين نفس الحالتين الابتدائية والنهائية للنظام ، انجز النظام شغلاً يساوي ( 35000 J ) . احسب مقدار واتجاه ( إشارة ) الحرارة المنتقلة خلال هذا الإجراء الجديد .

$$\Delta E = E_2 - E_1 = Q - W \quad \text{بتطبيق القانون الأول}$$

$$\Delta E = 40000 - 45000 = - 5000 \text{ J} \quad \text{تقل الطاقة الداخلية للنظام بمقدار :}$$

$$\Delta E_{\text{constant}} = - 5000 \text{ J} \quad \text{خلال الإجراء الجديد ،}$$

$$- 5000 - Q = 35000 \quad \text{تنتقل الحرارة باتجاه موجب}$$

$$Q = + 30000 \text{ J} = + 30 \text{ KJ} \quad \text{من المحيط الخارجي إلى النظام .}$$



## ٢ - ٢ - ٢ الطاقة الداخلية : ( Internal energy )

من الممكن بناء نظام ثيرموديناميكي تام العزل ، بحيث يتم الاتصاف من دون حدوث أي تبادل حراري عبر حدود هذا النظام ، والإجراء الذي يتم من دون انتقال للحرارة (  $Q = 0$  ) في مثل هذا النظام يسمى بالإجراء الأديباتيكي . ومن الخصائص الهامة لهذا الإجراء أن الشغل المنجز خلال هذا الإجراء يعتمد فقط على نقط البداية والنهاية للإجراء ، وليس على المسار (path) الذي يتخذه الإجراء .

يمكن كتابة المعادلة ( ٢ - ١ ) بصيغتها التفاضلية ( Differential form ) على النحو :

$$dQ = dU + dW \quad ( ٢ - ١ )$$

وللإجراء الأديباتيكي (  $dQ = 0$  ) ، فإن هذه المعادلة تصبح :

$$U_2 \\ W = - \int_{U_1} dU = U_1 - U_2 \quad ( ٢ - ٢ )$$

وهكذا ، فإن مقدار الشغل المنجز في الإجراء الأديباتيكي يعتمد فقط على قيم الطاقة الداخلية الابتدائية (  $U_1$  ) والنهاية (  $U_2$  ) ، وليس هناك ضرورة لمعرفة مسار الإجراء كما هو واضح من المعادلة ( ٢ - ٢ ) .

في الإجراء الذي يبقى فيه الحجم ثابتاً ( شبات الحجم ) ، فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = dU \quad ( dV = 0 ) \quad ( ٢ - ٣ )$$

وبقسمة طرفي المعادلة على (  $dT$  )

$$\frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} \quad ( dV = 0 ) \quad ( ٢ - ٤ )$$

وإن القيمة (  $dQ / dT$  ) هي تعريف السعة الحرارية ، وبما أن الحجم يبقى ثابتاً فإن هذه السعة ، هي السعة الحرارية عند شبات الحجم (  $C_V$  ) .

$$\frac{dQ}{dT} = C_v \quad (١٠-٢)$$

من المعادلتين (٩-٢) و (١٠-٢)

$$dU = C_v dT \quad (dV = 0) \quad (١١-٢)$$

هناك حالات تبقى فيها المعادلة (١١-٢) قابلة للتطبيق (صحيحة) .  
حتى في حالة تغير الحجم (  $dV \neq 0$  ) . ولهذا ، فإنه يمكن كتابة القانون الأول  
على النحو :

$$dQ = C_v dT + p dV \quad (١٢-٢)$$

### ٢-٢-٣ إجراءات الغاز المثالي :

الغاز المثالي ( Ideal gas ) هو الغاز الذي يحقق المعادلات الآتية :

$$\left. \begin{array}{l} PV = nRT \\ \text{or} \\ P_v = R T \end{array} \right\} \quad (١٣-٢)$$

$$C_p = \text{constant} \quad (١٤-٢)$$

حيث :

P : ضغط الغاز المطلق (  $N / m^2$  ) .

V : حجم الغاز (  $m^3$  ) .

N : عدد المولات ( number of moles ) للغاز .

R : ثابت الغاز (  $J / \text{mole} \cdot K$  ) .

T : درجة حرارة الغاز المطلق (  $K$  ) .

v : الحجم النوعي للغاز (  $m^3 / kg$  ) .

$C_p$  : الحرارة النوعية للغاز عند ثبات الضغط (  $J / kg \cdot K$  ) .

ويطلق على المعادلة ( ١٢ - ٢ ) اسم معادلة الحالة للغاز ( Equation of State ) في أغلب الأحيان .

ترتبط كل من (  $C_p$  ) و (  $C_v$  ) بالمعادلة :

$$C_p = C_v + nR \quad ( ١٥ - ٢ )$$

من المعادلتين ( ١٢ - ٢ ) و ( ١٥ - ٢ ) — وباستخدام الصيغة التفاضلية (  $dQ / dT$  ) لتعريف الحرارة النوعية — فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = C_p dT - V dp \quad ( ١٦ - ٢ )$$

١ — الإجراء الأديباتيكي ( Adiabatic process ) :

باستخدام المعادلة (  $dQ = 0$  ) للإجراء الأديباتيكي فإنه بالإمكان حذف (  $dt$  ) من كلا المعادلتين ( ١٢ - ٢ ) و ( ١٦ - ٢ ) للوصول إلى المعادلة :

$$p V^\gamma = \text{const.} \quad ( ١٧ - ٢ )$$

حيث :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad \text{الأس الايسونتروبي للغاز}$$

ويمكن حساب الشغل المنجز في حالة الإجراء الأديباتيكي من المعادلة ( ١٢ - ٢ ) كما يلي :

$$0 = C_v dt + P dV \quad ( ١٨ - ٢ )$$

أو :

$$\Delta W = - C_v \Delta T \quad ( ١٩ - ٢ )$$

مثال :

يُدخل البخار لتوربين — ضغط منخفض بدرجة حرارة  $260^{\circ}\text{C}$  من ويخرج بدرجة حرارة  $35^{\circ}\text{C}$  من ، بافتراض عدم وجود تبادل حراري مع المحيط الخارجي، ما هو مقدار الشغل الذي ينتجه البخار ؟

إذا كانت الحرارة النوعية للبخار عند ثبات الحجم

$$C_v = 2009.3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$\Delta W = - C_v \Delta T$$

$$W = - 2009.3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} (35 - 260)^{\circ}\text{C}$$

$$W = 452093 \text{ J / kg}$$

يوضح الشكل ( ٢ - ٥ ) الإجراء المذكور على مخطط الضغط — الحجم النوعي ( P-v ) .

٢ — إجراء ثبات الحجم الإيسوخوري :

**Isovolumic Process (isochoric)**

باستخدام المعادلة (  $dv = 0$  ) لهذا الإجراء فإن الشغل المنجز (  $dW = 0$  ). ومن المعادلة ( ٢ - ١٢ ) نجد :

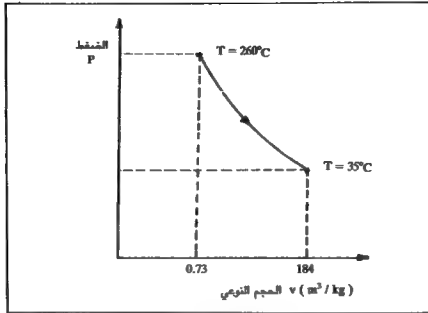
$$dQ = C_v dT \quad ( ٢ - ٢٠ )$$

أو :

$$Q = C_v \Delta T \quad ( ٢ - ٢١ )$$

وبمعرفة الحرارة المكتسبة خلال هذا الإجراء ( ثبات الحجم ) فإنه يمكن حساب التغير في الضغط بالاستعانة بالمعادلة ( ٢ - ١٦ )

$$C_v dT = C_p dT - v dp \quad ( ٢ - ٢٢ )$$



الشكل ( ٢ - ٥ )  
الإجراء الإنشائي على مخطط ( P-v )

$$dp = \frac{nR}{V} dT \quad ( ٢٢ - ٢ )$$

مثال :

بافتراض أن عملية احتراق شمعة الوقود في أسطوانة السيارة تتم مع ثبات الحجم (تقريباً) ، لحسب التغير في الضغط خلال هذا الإجراء إذا علمت أن درجة الحرارة تزداد من ٤٠٠°س إلى ٢١٨٠°س خلال الاحتراق .

بافتراض أن الوسيط العامل هو الهواء فإنه يمكن إيجاد عدد المولات من المعادلة ( ١٢ - ٢ )

$$n = \frac{P_0 V}{RT_0}$$

بالتعويض في المعادلة ( ٢٢ - ٢ )

$$\Delta p = \frac{P_0 V R}{R T_0} \frac{\Delta T}{V} = \frac{P_0 \Delta T}{T_0} = \frac{P_0 (T_1 - T_0)}{T_0}$$

$$T_0 = 400 + 273 = 673 \text{ K}$$

$$T_1 = 2180 + 273 = 2453 \text{ K}$$

$$\Delta P = \frac{1 \text{ atm} \times (2453 - 673)}{673} = 2.64 \text{ atm} \quad (\text{ضغط جوي})$$

٣ - الإجراء الأيسوثيرمي — ثبات درجة الحرارة :

( Isothermal Process )

باستخدام المعادلة (  $d t = 0$  ) لهذا الإجراء وبالتعويض في المعادلة ( ١٢ - ٢ ) نجد :

$$d Q = p d V \quad ( ٢٤ - ٢ )$$

أو :

$$Q = \int_{V_1}^{V_2} p d V \quad ( ٢٥ - ٢ )$$

وبالتعويض عن (  $p$  ) من معادلة الحالة للغاز المثالي في المعادلة ( ٢٥ - ٢ ) نجد :

$$Q = n R T \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \quad ( ٢٦ - ٢ )$$

مثال :

إحدى وسائل تخزين الطاقة ، تكون بضغط الغاز المضغوط في فجوات ضخمة

تحت الأرض ولعسل ذلك ايسوثيرمياً ، كان الضغط الابتدائي ١ ضغط جوي (1 atm) والضغط النهائي ٢٥ ضغط جوي. فما هو مقدار الحرارة المنتقلة لكل مول في هذا الإجراء؟

افترض درجة الحرارة  $T = 30^{\circ}\text{C}$  ، وأن ثابت الغاز للهواء

$$R_2 = 8.317 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}}$$

للإجراء ايسوثيرمي فإن  $(P_1 V_1 = P_2 V_2)$  ولهذا يمكن كتابة المعادلة (٢ - ٢٦) على النحو :

$$Q = n R_2 T \ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$Q = 8.317 \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} 303 \text{ K} \ln \left( \frac{1}{25} \right)$$

$$Q = -8111.7 \text{ J / mole}$$

حيث ان الإشارة السالبة تعني ان الحرارة تُفقد من النظام ( الهواء المضغوط ) .

٤ - الإجراء الإيسوباري — ثابت الضغط : ( Isobaric Process )  
هناك إجراءات حقيقية كثيرة تتم عند ثابت الضغط ( مثل معظم التفاعلات الكيميائية ) ولهذا الإجراء  $(dp = 0)$  ، وبلاستعملت بالمعادلة (٢ - ١٦) نجد :

$$dQ = C_p dT \quad (٢٧ - ٢)$$

أو:

$$Q = C_p \Delta T \quad (٢٨ - ٢)$$

ويستخدم هذه النتيجة فإنه يمكن حساب الشغل من المعادلة (٢ - ١٧)

$$C_p \Delta T = C_v \Delta T + p \Delta V \quad (٢٩ - ٢)$$

## ٢ - ٣

### القانون الثاني في الترموديناميك

بينما يحدد القانون الأول العلاقة بين الشغل والحرارة في الدورة التيرموديناميكية فإنه لا يضع حداً لمقدار هذا التحول من شغل إلى حرارة ، فحدود أو مقدار هذا التحول في الدورة المطلقة يحكمه القانون الثاني الذي ينص على ما يلي :

من المستحيل بناء آلة تعمل على دورة تيرموديناميكية مغلقة تتحول الحرارة فيها إلى شغل فقط ، بمعنى آخر فإنه من المستحيل الحصول على آلة حرارية كفاءتها ١٠٠ % .

في أي دورة تيرموديناميكية حقيقية فإنه يجب أن تكون هناك حرارة مطروقة أو مفقودة — حسب القانون الثاني — ولهذا فإن الشغل الصافي الناتج عن الدورة يكون هو الفرق بين الحرارة المكتسبة أو المضافة للدورة والحرارة المفقودة أو المطروقة من الدورة .

$$W_{th} = Q_R - Q_F \quad (٢٠ - ٢)$$

وتكون الكفاءة الحرارية للدورة :

$$\eta_{th} = \frac{Q_R - Q_F}{Q_R} = 1 - \frac{Q_F}{Q_R} \quad (٢١ - ٢)$$

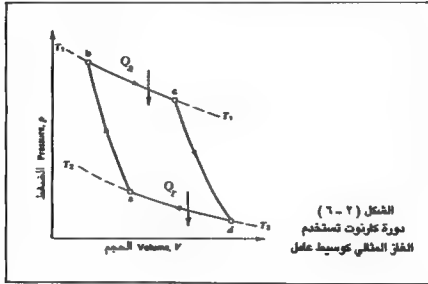
وكما نرى فإن هذه الكفاءة تكون أكبر ما يمكن (١٠٠ %) عندما تكون قيمة الحرارة المطروقة صفراً (  $Q_F = 0$  ) ، ولكن كما سبق ونذكرنا فإن ذلك يكون مستحيلاً حسب القانون الثاني



ويبقى السؤال قائماً ، ولكن ما هو مقدار أكبر كفاءة يمكن الحصول عليها من دورة كهذه؟ للإجابة عن هذا السؤال لا بد لنا من دراسة دورة كارنوت ( Carnot Cycle ) التيرموديناميكية .

### ٢ - ٣ - ١ دورة كارنوت : ( Carnot Cycle )

درست هذه الدورة لأول مرة من قبل المهندس الفرنسي ( سادي كارنوت ) وتتكون من الإجراءات التيرموديناميكية الآتية : ( شكل ٢ - ٦ )



- ١ - الإجراء ( a → b ) إجراء انعكاسي أدياباتيكي ( ايزونتروبي ) ترتفع خلاله درجة حرارة الوسيط العامل ( غاز ) من درجة حرارة المصدر البارد (  $T_2$  ) إلى درجة حرارة المصدر الساخن (  $T_1$  ) .
- ٢ - الإجراء ( b → c ) يتم خلاله تمدد الوسيط انعكاسياً وايزوثيرمياً ( ثبوت درجة الحرارة ) على درجة حرارة المصدر الساخن (  $T_1$  ) .
- ٣ - الإجراء ( c → d ) يتم خلاله تمدد الوسيط انعكاسياً وادياپاتيكيّاً ( ايزوثيرمياً ) حتى تعود درجة حرارته مرة أخرى إلى (  $T_2$  ) .

٤ - الإجراء (  $d \rightarrow a$  ) يتم خلاله انضغاط الوسيط انعكاسياً وايزوثيرمياً على درجة الحرارة (  $T_2$  ) ، حتى يعود إلى وضعه الأصلي ، ويتم تمام هذا الإجراء تكتمل الدورة .

تسمى كل آلة تعمل باستخدام هذه الدورة بآلة كارنوت ، وفي الواقع العملي فإنه لا يوجد مثل هذه الآلة ولكن مفهومها مفيد جداً في التيرموديناميكا حيث أنه يمكننا من حساب كفاءة هذه الآلة ومقارنة كفاءات الآلات الأخرى بها، لأن كفاءة آلة كارنوت هي أعلى كفاءة يمكن الوصول إليها ولا يمكن لأي آلة حرارية أن تحقق كفاءة أعلى منها. وتعطى كفاءة آلة كارنوت بالمعادلة الآتية

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_r}{Q_a} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad ( ٢٢ - ٢ )$$

حيث أن :

$T_2$  : درجة حرارة المصدر البارد المطلقة ( K )

$T_1$  : درجة حرارة المصدر الساخن المطلقة ( K )

إن أي آلة حقيقية تعمل بين درجتي الحرارة (  $T_1$  ) و (  $T_2$  ) ، لها كفاءة أقل من كفاءة كارنوت .

مثال :

سيارة كفاءتها الحرارية الفعلية (  $\eta_{th} = 30\%$  ) . قارن بين هذه الكفاءة وبين أقصى كفاءة ممكنة للسيارة إذا علمت أن درجة حرارة المصدر الساخن ( درجة حرارة الاحتراق داخل اسطوانات السيارة ) هي (  $1500^\circ\text{C}$  ) .

نفترض أن درجة حرارة المصدر البارد ( الجو ) هي (  $20^\circ\text{C}$  ) .

فالمسيارة عبارة عن آلة تعمل بين درجتي حرارة المصدر الساخن ( الاحتراق داخل الاسطوانات ) والبارد ( الجو الخارجي ) .

$$T_2 = T_L = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad \text{درجة مطلقة}$$

$$T_1 = T_H = 1500 + 273 = 1773 \text{ K} \quad \text{درجة مطلقة}$$

$$\eta_c = 1 - 293 / 1773 = 0.835$$

فهذه الكفاءة ( كفاءة كارنوت ) اكبر من الكفاءة الفعلية بمقدار :

$$0.835 / 0.3 = 2.78$$

## ٢ - ٣ - ٢ المحرك الحراري :

يُعرف المحرك الحراري بأنه محرك ( يعمل باستمرار ) على نظام تيرموديناميكي على حدوده تباين بين الحرارة والشغل .

فهو عبارة عن محمول للطاقة يعمل بشكل دوري ( يمرر الوسيط العامل بعمليات دورية ) ، فيكتسب الحرارة من مصدر ذي درجة حرارة مرتفعة (  $T_1$  ) ويحول جزءاً من هذه الطاقة إلى شغل مفيد (  $W_n$  ) ويفقد الجزء المتبقي إلى المصدر ذي درجة الحرارة المنخفضة (  $T_2$  ) كما هو مبين في الشكل ( ٢ - ١٧ )

يبين الشكل ( ٢ - ٧ ب ) توريين غازي يعمل على دورة تيرموديناميكية مغلقة ويمثل الخط المنقطع حدود هذا النظام حيث يتم اكتساب الحرارة (  $q_1$  ) وفقد الحرارة (  $q_2$  ) عبر حدود النظام ويتولد الشغل (  $W_n$  ) ويقطع حدود النظام. وبما أن الوسيط العامل ( الغازات ) يمر بعمليات دورية فإن تعريف المحرك الحراري ينطبق على هذا التوريين، فهو محرك حراري.

كفاءة المحرك الحراري :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_1} \quad ( ٢ - ٢٢ )$$

وبتطبيق القانون الأول في التيرموديناميك نجد :

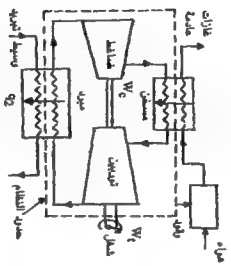
$$W_n = q_1 - q_2 \quad ( ٢ - ٢٤ )$$

إذاً :

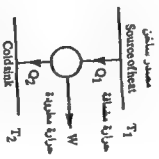
$$\eta_{th} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad ( ٢ - ٢٥ )$$

وكما مر سابقاً فإن اكبر كفاءة يمكن الحصول عليها هي كفاءة كارنوت

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad ( ٢ - ٢٦ )$$



(٢)



$$T_1 > T_2$$

$$W = Q_1 - Q_2$$

$$\eta_{th} = \frac{Q_1}{W}$$

(١)

الضغط (P - Pa)  
الحرارة الحرارية

مثال :

في توربين غازي يعمل على دورة مغلقة كانت الحرارة المكتسبة من مصدر الحرارة الساخن ( الوقود ) هي ( 5 KJ ) لكل ( kg ) من الوسيط العامل وكانت الحرارة المفقودة إلى المصب البارد ( المكثف ) هي ( 3.5 KJ / kg ) . احسب الشغل المنجز وكفاءة الدورة الحرارية .

$$W_n = q_1 - q_2 = 5 - 3.5 = 1.5 \text{ KJ / kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_1} = \frac{1.5}{5} = 30 \%$$

إذا علمت أن درجة حرارة المصدر الساخن (  $T_1 = 1000^\circ \text{C}$  ) ودرجة حرارة المصب البارد (  $T_2 = 25^\circ \text{C}$  ) فما هي أقصى كفاءة ممكنة لهذه الدورة ؟ أقصى كفاءة ممكنة هي كفاءة كارنوت :

$$\eta_c = 1 - \frac{(25 + 273)}{(1000 + 273)} = 0.776 = 77.6 \%$$

### ٢ - ٣ - مخططات الإنتروپيا : ( Entropy diagrams )

في إجراء ما ، كإجراء انضغاط أو تمدد لغاز من دون حدوث انتقال حرارة من الغاز إلى المحيط الخارجي أو العكس فإن هذا الإجراء يسمى إجراء اديباتيكية . فالإجراء اديباتيكي هو الإجراء الذي تكون فيه (  $Q = 0$  ) وإذا تم هذا الإجراء من دون حدوث فواقد داخلية — كالفواقد الناتجة عن الاضطرابات بين جزيئات الغاز — فإن هذا الإجراء يسمى إجراء انعكاسياً أو ارجاعياً أي انه بالإمكان إعادة هذا الإجراء بشكل عكسي ليعود الغاز إلى حالته الأولى .

والإجراء الذي يحقق هذين الشرطين معاً ( اديباتيكية + الانعكاسية ) يسمى بالإجراء الايزونتروپي ( Isentropic ) . الانتروپيا التي يرمز لها في الترموديناميكا بالرمز ( S ) هي مفهوم ترموديناميكي هام. فالإجراء الايزونتروپي هو ذلك الإجراء الذي لا تتغير فيه قيمة الانتروپيا، أي أن (  $\Delta S = 0$  ) لهذا الإجراء .

إذا تم اكتساب الحرارة ( Q ) على درجة حرارة مطلقة ثابتة مقدارها ( T ) فإن الانتروپيا ( S ) تزداد بمقدار

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (15)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن وحدات الانتروپيا ( S ) هي ( J / kg )

وتبرز أهمية الانتروپيا في التيرموديناميكا الحرارية بشكل خاص ، حيث أنها تُسهّل رسم الدورات التيرموديناميكية وتطبيقاتها الرياضية ، ففي دورة كارنوت — الموضحة سابقاً — وجدنا أن هناك إجراءات تبقى فيها الانتروپيا ثابتة ( إجراءات ايزونتروپية ) ولهذا فإنه من الطبيعي أن نفكر في إعادة رسم هذه الدورة باستعمال مخطط تكون الانتروپيا إحدى إحداثياته ، وفي التيرموديناميكا فإنه من المألوف استخدام مخطط درجة الحرارة — الانتروپيا ( T - S ) لرسم الدورات المختلفة

يبين الشكل ( ٢ - ٨ ) دورة كارنوت — تستخدم الغاز كسيت عامل — على مخطط ( T - S ) ومن هذا الشكل نجد أن الإجرائين ( d → a ) و ( b → c ) هما إجراوان ايزوثيرميان ( ثبات درجة الحرارة ) ، فالحرارة المكتسبة في الدورة ( Q<sub>1</sub> ) هي المساحة تحت الإجراء ( b → c ) .

$$Q_1 = T_1 ( S_c - S_b ) \quad (٢٧ - ٢)$$

والحرارة المفقودة من الدورة ( Q<sub>2</sub> ) هي المساحة تحت الإجراء ( d → a )

$$Q_2 = T_2 ( S_d - S_a ) \quad (٢٨ - ٢)$$

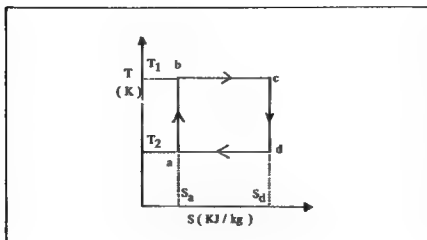
ويعطى الشغل المنجز بالمعادلة :

$$W_n = Q_1 - Q_2 \quad (٢٩ - ٢)$$

ولكن من الشكل نجد أن ( S<sub>d</sub> - S<sub>a</sub> = S<sub>c</sub> - S<sub>b</sub> ) ، إذا فالمساحة داخل الدورة ( a b c d ) هي الشغل المبذول :

$$W_n = ( T_1 - T_2 ) ( S_d - S_a ) \quad (٣٠ - ٢)$$

في الواقع العملي ، فإن الإجراءات يصلحها دائماً زيادة في الانتروپيا. فالإجراء الأيزونتروپي هو إجراء مثالي من الصعب جداً تحقيقه .

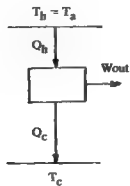


### ٢ - ٣ - ٤ : التلاجة ( دورة التبريد ) والمضخة الحرارية : ( Refrigerator and Heat pump )

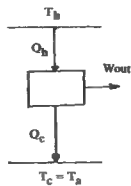
يبين الشكل ( ٢ - ٩ ) رسماً توضيحياً للمهمات الأربع التي يقوم بها المحرك الحراري حيث أن الشكل ( ٢ - ١٩ ) يبين محركاً حرارياً إعتيادياً والشكل ( ٢ - ٩ ب ) يبين محركاً حرارياً يعمل بين درجة حرارة الجو ( Ambient temperature  $T_a$  ) ودرجة حرارة مصدر بارد (  $T_c$  ) حيث تُنقص الحرارة من المصدر الساخن — نسبياً — (  $T_a$  ) وتطرد للمصدر البارد (  $T_c$  ).

مثل هذا المحرك نادر الاستعمال في الواقع العملي لأنه من الصعب توافر مصدر درجة حرارته أقل من درجة حرارة الجو . الشكل ( ٢ - ٩ ج ) يبين محركاً حرارياً معكوساً ، حيث أن الحرارة تُنقص من المصدر البارد (  $T_c$  ) وتطرد للمصدر الساخن ( درجة حرارة الجو  $T_a$  ) ، وذلك بإضافة شغل مقداره (  $W_{in}$  ) للنظام ، أي أن هذا المحرك يعمل كتلاجة . يعطى معامل الاداء للتلاجة بالمعادلة :

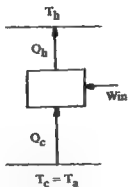
$$(COP)_R = \frac{Q_h}{W_{in}} \quad (٢ - ٤١)$$



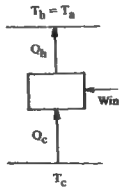
(ب) محرك حراري (بارد)



(1) محرك حراري اعتيادي



(د) مضخة حرارية



(ج) ثلاجة

الشكل (٢ - ٩)  
المهمات الأربع للآلة الحرارية



حيث :

$Q_c$  : الحرارة الممتصة من المصدر البارد ( يطلق عليه اسم المبرر في التلاجة ) .

$W_{in}$  : الشغل الخارجي المضاف للنظام .

وإذا كان الغرض من المحرك الحراري المعكوس هو امتصاص الحرارة من الجو (  $T_a$  ) وطرد هذه الحرارة إلى مصدر ذي درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الجو (  $T_h$  ) ، كما هو مبين في الشكل ( ٢ - ٩ ) ، فإن هذا المحرك يسمى بالمضخة الحرارية ( Heat pump ) . ويعطى معامل الأداء للمضخة الحرارية بالمعادلة :

$$(COP)_p = \frac{Q_h}{W_{in}} \quad (٢ - ٤٢)$$

حيث :

$Q_h$  : الحرارة المطروقة للمصدر الساخن ( بدرجة حرارة  $T_h$  )

وكما نلاحظ فإن الفرق بين التلاجة والمضخة الحرارية هو أن الاهتمام في حالة التلاجة يكون بمقدار الحرارة الممتصة من المصدر البارد (  $Q_c$  ) في حين أنه في حالة المضخة الحرارية فإن ما يعنينا هو الحرارة المطروقة للمصدر الساخن (  $Q_h$  ) . باستخدام القانون الأول يمكن إيجاد أقصى معامل أداء ممكن لكل من المضخة والتلاجة كالآتي :

للتلاجة :

$$(COP)_R = \frac{Q_c}{W_{in}} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

$$(COP)_R = \frac{T_h}{T_h - T_c} - 1 = \frac{1}{\eta_c} - 1 \quad (٢ - ٤٣)$$

المضخة الحرارية :

$$(COP)_p = \frac{Q_h}{W_{in}} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

$$(COP)_p = \frac{1}{\eta_c} \quad (٤٤ - ٢)$$

حيث :

$\eta_c$  : كفاءة دورة كارنوت .

وتكون العلاقة بين معاملي الأداء لكل من التلاجة والمضخة الحرارية :

$$(COP)_R = (COR)_p - 1 \quad (٤٥ - ٢)$$

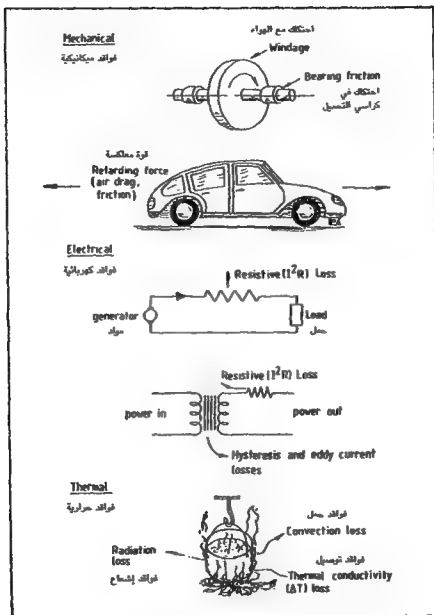
## ٢ - ٤

### العوائق العملية في تحويل الطاقة

في الواقع العملي فإن جميع الآليات مهما كان نوعها تعاني من بعض فواقد الاحتكاك بدرجة معينة. فالبندول المشروح سابقاً ( الشكل ٢ - ٢ ) يعاني من فواقد احتكاك لا إرجاعية أو لا إنعكاسية مع الهواء وعند نقطة التعليق. ومع مرور الوقت فإن حركة البندول تتباطأ تدريجياً حتى يتوقف البندول في النهاية عن الحركة. وفي جميع الأجهزة والآلات هناك دائماً ضياعات أو فواقد لا يمكن تجنبها وتسمى هذه الضياعات بالضياعات اللاإرجاعية .

وفي حالة الطاقة الحرارية فإنه لنقل هذه الطاقة يلزم فرق في درجة الحرارة بين نقطتين حتى تنتقل الحرارة بينهما عبر موصلات حرارية لها موصولية معينة. وهذا يعني حدوث انخفاض تدريجي في درجة الحرارة باتجاه انتقالها. مما يجعل هذه العملية ( عملية انتقال الحرارة ) عملية لا إرجاعية .

يبين الشكل ( ٢ - ١٠ ) بعض للضياعات اللاإرجاعية .



الشكل ( ٢ - ١٠ )  
بعض الضياعات ( الفوائد ) اللاإرغابية

## اعتبارات عملية في اختيار محولات الطاقة

من خلال دراستنا للقانونين الأول والثاني تبين لنا بأن عملية التحويل الكامل للطاقة من شكل لآخر لا تتم سوى في ظروف مثالية استثنائية . ففي عملية تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية فإن كفاءة التحويل تكون محدودة بدرجة حرارة كل من المصدر الساخن ( Th ) ودرجة حرارة المصب البارد ( Tc ) وأقصى كفاءة يمكن الحصول عليها من عملية التحويل هذه هي كفاءة كارنوت .

فعمليات تحويل الطاقة في الظروف الاعتيادية ( غير المثالية ) يرافقها دائماً فواقد لا إرجاعية تقلل من كفاءة التحويل .

عند اختيار محول للطاقة في تطبيق عملي معين فإن كفاءة التحويل تلعب دوراً هاماً في عملية الاختيار هذه. إذ أن الخسائر الناتجة عن تدني كفاءة التحويل في حالة استخدام محول الطاقة أو وقود رخيص الثمن قد تزيد عنها في حالة استخدام نظام بديل ذي كفاءة تحويلية أعلى أو وقود مرتفع الثمن — نسبياً — .

فهناك دائماً متغيرات عديدة يجب أخذها بعين الاعتبار والمقارنة فيما بينها عند اختيار نظام معين لتحويل الطاقة تساعد في تحديد الخيار الأنسب. وبعض هذه الاعتبارات ما يلي :

١ — رأس المال : للتكلفة المبدئية للجهاز أو النظام المراد تشغيله .

٢ — تكاليف التشغيل : مثل تكلفة الوقود مع أخذ كفاءة التحويل بعين الاعتبار وتكاليف الخدمة وقطع الغيار .

٢ - متطلبات الصيانة : مثل الفنيين المدربين والمختصين في محطات التوليد الكبيرة .

٤ - الموثوقية أو المروية ( Reliability ) للجهاز أو النظام واستمراره في الأداء . فمثلاً في حالة استخدام مضخة لرفع المياه في عملية الري فإن المطلوب هو جهاز تحويل ( محرك ) لتشغيل المضخة بشكل مرضٍ فترة طويلة من دون مشاكل فنية ...

٥ - الأمان ( Safty ) : وهذا اعتبار هام جداً في بعض التطبيقات العملية مثل استعمال اسطوانات الغاز المضغوط في المنازل لإنتاج الطاقة الحرارية .

وعلى المستوى الحكومي فإن اختيار جهاز تحويل الطاقة المناسب يخضع لاعتبارات أخرى أوسع وأشمل من الاعتبارات المذكورة أعلاه مثل : الأمان في التزويد وسياسات التسعير وسياسة الطاقة طويلة الأمد والاستخدام ( العمالة ) ومشاكل تلوث البيئة والأمان .

• • •

الفصل الثالث  
إنتاج الطاقة الحرارية





## مقدمة الفصل الثالث

الطاقة الحرارية هي شكل أساسي من أشكال الطاقة حيث أن جميع الأشكال الأخرى من الطاقة يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية .

فالطاقة الميكانيكية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية بواسطة الاحتكاك .

والطاقة الكهربائية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية في عملية تسخين جول، فالحرارة المتولدة نتيجة مرور تيار مقداره ( I ) أمبير في مقاومة مقدارها ( R ) أوم هي القدرة الكهربائية (  $P_c = I^2 R$  ) واط .

وتحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى طاقة حرارية في عملية تسمى بعملية الامتصاص مثل تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية .

والطاقة النووية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية بواسطة التفاعلات النووية المختلفة كالانشطار والاندماج النوويين .

## ٣ - ٢

### الاحتراق ( Combustion )

#### ٣ - ٢ - ١ وقود الاحتراق - المواد الهيدروكربونية التركيبية :

على الرغم من أن المركبات الهيدروكربونية تتكون جميعها من كربون ( C ) وهيدروجين ( H ) إلا أن إمكانية ترتيب ذرات الكربون والهيدروجين بعدة طرق تجعل من الممكن الحصول على مركبات هيدروكربونية متميزة وذات خصائص مختلفة تماماً بعضها عن بعض . فالهيدروجين ( H ) يمكن أن يشارك برابطة تساهمية واحدة بينما يمكن أن يشارك الكربون بأربعة روابط . هناك ثلاث مجموعات رئيسية للمركبات الهيدروكربونية هي :

##### ١ - الهيدروكربونات الأليفاتيكية : ( Aliphatic hydrocarbons )

وهي مركبات ذات سلسلة مستقيمة ومفتوحة وتسمى بالمركبات الهيدروكربونية الأليفاتيكية وهذه المركبات لها الصيغة العامة  $(C_n H_{2n} + 2)$  وأبسط هذه المركبات هو الميثان  $(CH_4)$  الشكل ( ٣ - ١ ) .



الشكل ( ٣ - ١ )  
الميثان  $CH_4$

ومعظم وقود المستحاثات تقع ضمن هذه العائلة أو المجموعة. ومن الأمثلة الأخرى على هذه المجموعة البننتان (  $C_5 H_{12}$  Pentane ) .

وتقسم هذه المجموعة إلى ثلاث مجموعات فرعية ، هي :

( ١ ) الألكانات ( Alkane ) .

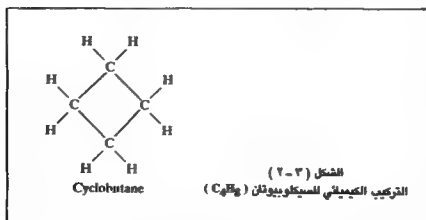
( ب ) الألكينات ( Alkene ) .

( ج ) الألكاينات ( Alkyne ) .

٢ - الهيدروكربونات الأيسايليكية - الحلقية :

( Alicyclic hydrocarbons )

وهذه المجموعة هي مجموعة حلقية ( Ring ) بسبب أن الجزيئات تحتوي على حلقات من ذرات الكربون . والصيغة العامة لهذه المجموعة هي (  $C_n H_{2n}$  ) ، ومن الأمثلة على مركبات هذه المجموعة السيكلوبيوتان ، المبين في الشكل ( ٢ - ٣ ) .



٣ - الهيدروكربونات الأروماتية أو العطرية : ( Aromatic )

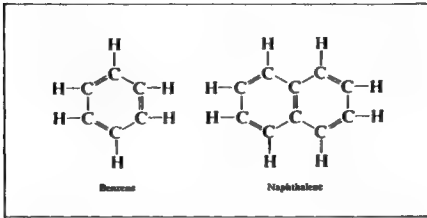
وهي أيضاً مركبات حلقية كسابقتها وتكون الحلقة الأساسية هي حلقة بنزين ( Benzene ring ) أو حلقات بنزين. وهذه الحلقة هي عبارة عن حلقة ذات ست ذرات كربون والصيغة العامة لهذه المجموعة ، هي :

للجزيئات ذات الحلقة المفردة (  $C_n H_{2n-6}$  ) .

للجزيئات ذات الحلقة المضاعفة (  $C_n H_{2n-12}$  ) .

ومن الأمثلة على ذلك البنزين (  $C_6 H_6$  ) والنفثالين (  $C_{10} H_8$  ) المبينة

في الشكل ( ٣ - ٢ ) .



الشكل ( ٣ - ٢ )

التركيب الكيميائي لكل من البنزين والنفثالين

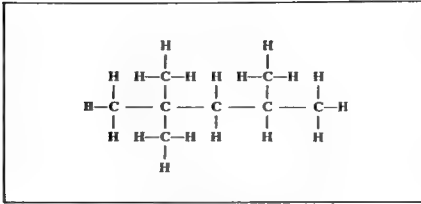
### ٣ - ٢ - ٢ الوقود المعياري : ( Standard Fuels )

هناك مركبات هيدروكربونية أساسية تستعمل كوقود معياري ( قياسي ) في محرك الاحتراق الداخلي. ففي حالة آلة الاحتراق الداخلي بالإشعال ( SI ) فإن الوقود لهذه الآلة يُصنف ( Rated ) حسب رقم الاكتين :

أعطي الايسوكتين (  $C_8 H_{18}$  ) الرقم الاكتيني ( ١٠٠ ) مئة ( الشكل ( ٤ - ٣ ) :

وأعطي n - بنتان (  $C_7 H_{16}$  ) الرقم الاكتيني صفر .

ولمعرفة الرقم الاكتيني لوقود ما يتم إحراقه في آلة فحص خاصة حتى



الشكل ( ٣ - ٤ )  
التركيب الكيميائي لمركب الايسوكتين ( $C_8H_{18}$ )

تحصل ظاهرة الصنف ( Detonation ) ثم تُخط نسب حجمية من الايسوكتين و n - بنتان ( الوقود المعياري ) حتى نصل إلى مزيج له نفس خصائص الوقود المراد فحصه من حيث ظاهرة الصنف فتكون نسبة الايسوكتين في هذا المزيج هي الرقم اكتيني للوقود تحت الفحص .

ومعظم أنواع البنزين لها ارقام اكتينية تتراوح ما بين ( ٨٥ - ٩٥ ) وهناك أنواع من البنزين لها ارقام اكتينية اعلى من ( ١٠٠ ) ويمكن الحصول على هذا النوع من الوقود بإضافة مواد هيدروكربونية أخف من البنزين أو بإضافة مادة ( TEL TetraethylLead ) للوقود الاساسي ( البنزين ) .

بالنسبة لمحرك الاحتراق الداخلي بالانضغاط ( C I ) فإن وقود هذه المحركات يصنف حسب رقم السيتين ( Cetane No. ) .

اعطي مركب n - هكسديكين ( $C_6H_{14}$  n-Hexadecane ) الرقم السيتيني ( ١٠٠ ) مئة .

واعطي مركب الفا - ميتانفتالين ( alpha-methylnaphthalene ) الرقم السيتيني صفر .

ويتم تصنيف وقود محركات الديزل بنفس الطريقة التي يصنف بها وقود

محركات البنزين باستخدام آلة فحص خاصة بمحركات الديزل .  
والأرقام السيئية لمعظم انواع وقود محركات الديزل تتراوح ما بين  
( ٢٠ - ٦٠ ) .

### ٣ - ٢ - ٣ فيزياء الاحتراق وتفاعلاته :

في الوقت الحاضر فإن المصدر الاساسي للطاقة هو توليد الطاقة الحرارية  
من الطاقة الكيميائية واكثر التفاعلات الطاردة للحرارة اهمية في هذا المجال  
هو الاحتراق ، حيث تتأكسد في هذا التفاعل العناصر الثلاثة الرئيسية الموجودة  
في وقود المستحاثات ، وهي : الكربون ( C ) ، والهيدروجين ( H ) ، والكبريت  
( S ) ، إلى ثاني اكسيد الكربون (  $C O_2$  ) ، والماء (  $H_2 O$  ) ، وثاني اكسيد  
الكبريت (  $S O_2$  ) .

تتم عملية الاحتراق الفعلية لوقود المستحاثات بطريقتين :

١- عند خلط وتسخين الهيدروكربونات في حالتها الغازية - بما في ذلك  
الموائك المتبخرة - قبل حدوث الإشعال فإن الأكسجين يتفاعل مع  
جزيئات الهيدروكربون في عملية تسمى عملية تكون الهيدروكسيل  
( Hydroxlation ) والمركبات الناتجة من هذه العملية تسمى  
المركبات الهيدروكسيلية والتي تكون غير مستقرة وتحول بسرعة إلى  
الدهايدات ( Aldehydes ) مثل الفورمالدهايد ( Formaldehyde )  
(  $C H_2 O$  ) ومن ثم يحترق الادهاييد إلى ثاني اكسيد الكربون  
(  $C O_2$  ) وماء (  $H_2 O$  ) واللهب الناتج يكون أزرق اللون وغير  
متوهج ( non luminous ) ، ويستعمل هذا النوع من الاحتراق في  
حارقات بنسون في المختبر وفي المدافئ وعلبأخت الغاز في البيوت .

٢ - في هذا النوع من الاحتراق يدخل كل من الوقود والهواء إلى الحارقة  
من دون عملية خلط مسبقة وهذا يتسبب في حدوث عملية خلط سريعة  
جداً وتسخين سريع للوقود والهواء مما يؤدي إلى تحطيم المركبات  
الهيدروكربونية إلى مركبات أخف وزناً ومن ثم إلى العناصر الأساسية  
من كربون وهيدروجين .

ونتيجة لهذا التحلل الحراري فإن معظم الاحتراق يجري لكل من عناصر الهيدروجين والكربون على حدة ، حيث يحترق الهيدروجين بلهب غير مرئي بينما يحترق الكربون بلهب أصفر ومتوهج. وهذا النوع من التفاعل يَقلب على احتراق الوقود الصلب ومعظم المواد الهيدروكربونية السائلة .

واحتراق اللهب الأصفر هو نوع مرغوب من الاحتراق خصوصاً في مراحل المحطات الكبيرة حيث انه يزيد من الطاقة المنقلة بالإشعاع إلى أنابيب التسخين للمرجل ويخفض درجة حرارة الاحتراق .

وهناك ثلاث طرق فيزيائية لحرق وقود المستحاثات ، وهي :

١ — طريقة فرش الاحتراق ( Burning bed systems ) وتستعمل هذه الطريقة لحرق الوقود الصلب كما هو الحال في فرن ستوكر ( Stoker furnace ) حيث يجري حرق الفحم على قاعدة ثابتة أو فرش ثابت ( Stationary bed ) وكذلك تستخدم في عملية الاحتراق بواسطة الطبقات المخفلة ( Fluidized bed combustion ).

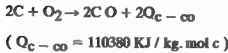
٢ — طريقة اللهب المتحرك ( Travelling flame ) ويستخدم هذا النوع من الاحتراق في حالة استخدام الخلط المسبق للمفاعلات مع الهواء حيث يتمركز اللهب بسرعة عبر الخليط بعد بدء الإشتعال كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي بالإشتعال .

٣ — المشعل الغازي ( Gaseous torch ) ويستعمل هذا الاحتراق في محطات الطاقة الكبيرة حيث يجري خلط الوقود والهواء وحرقهما في الحارقة مباشرة. وكذلك ينطبق هذا النوع من التسمية على احتراق الوقود السائل المذّر ( Atomized liquid fuels ) والوقود الصلب المسحوق بنعومة فائقة ( Finely powdered ) كما هو الحال في الفحم الحجري المطحون أو المسحوق ( Pulverized coal ) وعند حرق الوقود الثقيل بهذه الطريقة يتم تسخينه أولاً ثم تذريره ( Atomization ) في الحارقة . وهناك طرق أخرى للحرق ، تجمع الثلاثة أنواع — في نفس الوقت — كما هو الحال في الفرن الدوامي ( Cyclone furnace ) حيث يحترق الفحم الحجري المهشم في دوامة مشتعلة .

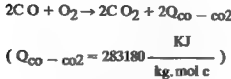
### ٣ - ٢ - ٤ : تفاعل الاحتراق الكيميائي والقيم الحرارية :

يعتبر الكربون واحداً من أهم العناصر القابلة للاحتراق وجزءاً جوهرياً من أي مركب هيدروكربوني ، وعملية الأكسدة للكربون تعتبر عملية بطيئة وصعبة بالمقارنة مع تأكسد الهيدروجين أو الكبريت على الرغم من أن الكربون له درجة اشتعال أقل منها للهيدروجين وهي  $407^{\circ}\text{C}$  .

في أي عملية احتراق نظرية فإنه من المألوف أن نفترض أن عنصري الهيدروجين والكبريت يحترقان قبل الكربون وكذلك بالإمكان الافتراض أن جميع الكربون يتأكسد إلى أول أكسيد الكربون، (CO) قبل أن يتحول إلى ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) والتفاعل الكيميائي للكربون هو :



حيث أن (Q<sub>C - CO</sub>) هي القيمة الحرارية اللازمة لتحويل الكربون إلى أكسيد الكربون ( الحرارة المنطلقة أو المحررة نتيجة لهذا التفاعل ) وبني هذا التفاعل فإن مولين من الكربون ( ٢٤,٠٢ كغم ) يتفاعلان مع مول واحد من الأكسجين ( ٣٢ كغم ) لإنتاج مولين من أول أكسيد الكربون ( ٥٦,٠٢ كغم ) وإذا توافر الأكسجين بشكل زائد ، فإن أول أكسيد الكربون يتأكسد إلى ثاني أكسيد الكربون حسب التفاعل التالي :



ومن هذا التفاعل نجد أن مولين من أول أكسيد الكربون يتفاعلان مع مول من الأكسجين لإنتاج مولين من ثاني أكسيد الكربون ( ٨٨,٠٢ كغم ) ويلزم كمية من الأكسجين مقدارها ( ١٦ / ٢٤,٠٢ = ٢,٦٦ كغم ) لحرق ( ١ كغم ) من الكربون بشكل كامل. وهذه النسبة مفيدة في تقدير كمية الأكسجين اللازمة لحرق الهيدروكربونات

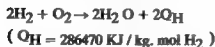
$$2.66 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg}^{\circ}\text{C}$$



والقيمة الحرارية العليا ( H H V ) والدنيا ( L H V ) للكريون متساوية وهي :

$$( H H V = L H V = 32778 \frac{KJ}{kg^{\circ}C} )$$

للهيدروجين أعلى درجة حرارة اشتعال ( ٥٨٢ ° س ) من بين العناصر المشتعلة ولكن عملية احتراقه سريعة جداً ويحترق بلهب غير مرئي ، وإذا توافر الأكسجين الكافي فإن الهيدروجين يتحول إلى ماء بسرعة كبيرة جداً — قد تسبق تحول الكربون إلى أول أكسيد الكربون — حسب التفاعل :



وكما نرى فإن موليّن من الهيدروجين ( ٢٢,٠٣٢ كغم ) يتفاعلان مع مول واحد من الأكسجين ( ٣٢ كغم ) لتنتج موليّن من الماء ( ٣٦,٠٣٢ كغم ) وهكذا فإن كتلة الأكسجين اللازمة لحرق ( ١ كغم ) من الهيدروجين بشكل كامل هي :

$$32 / 4.032 = 7.94 \text{ kg } O_2 / \text{ kg } H_2$$

والقيمة الحرارية العليا ( H H V ) للهيدروجين هي :

$$( H H V = 142097 kJ / kg )$$

والقيمة الحرارية الدنيا ( L H V ) للهيدروجين هي :

$$( L H V = 120067 KJ / kg )$$

أما الكبريت فله درجة حرارة اشتعال مقدارها ٢٤٢ ° س ويتطلق الحرارة من تأكسده إلى ثاني أكسيد الكبريت  $S O_2$  — لحد ملوثات الجو الخطرة — بواسطة التفاعل التالي :



حيث إن مولاً واحداً من الكبريت ( ٣٢,٠٦ كغم ) يتفاعل مع مول واحد من الأكسجين ( ٣٢ كغم ) لإنتاج مول واحد من ثاني أكسيد الكبريت ( ٦٤,٠٦ كغم )

وهكذا يلزم :

$$32 / 32.06 = 0.998 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg S}$$

والقيم الحرارية العليا والدنيا للكبريت متساويتان :

$$(H H V = L H V = 9257 \text{ KJ} / \text{kg S})$$

ولأغراض حسابات الاحتراق فإننا سنفترض أن الهواء الجوي يتكون من ٢١ ٪ أكسجين و ٧٩ ٪ نيتروجين وهذه نسب حجمية وتساوي ٢٢,٢ ٪ أكسجين و ٧٦,٨ ٪ نيتروجين كتسب وزنية ( كتلية ) .

والوزن الجزيئي للهواء هو :

$$(M W_a = 28.97 \frac{\text{kg}}{\text{kg. mol}})$$

٣ - ٢ - ٥ القيمة النظرية لنسبة الهواء / الوقود :  
( Theoretical air-fuel ratio )

إن القيمة النظرية أو الستويكمتريية ( Stoichiometric ) لنسبة هواء / وقود تُحدد القيمة الدنيا اللازمة من الهواء ليتم الاحتراق بشكل كامل ، ويمكن التعبير عنها بإحدى النسب الآتية :

١ - كتلة الهواء / كتلة الوقود .

٢ - مولات الهواء / مولات الوقود .

٣ - حجم الهواء / حجم الوقود .

من خلال دراسة تفاعلات الاحتراق ، توصلنا إلى أن نسب الأكسجين اللازمة لحرق كل من الكربون والهيدروجين والكبريت هي :

$$2.66 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg C}$$

$$7.94 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg H}_2$$

$$0.998 \text{ kg O}_2 / 1 \text{ kg S}$$

وهكذا فإن نسبة الكتلة ( هواء / وقود ) النظرية الجافة ( dry ) :

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th, m} = \frac{\text{كتم } (O_2) \text{ اللازمة من الهواء لكل (كتم) من الوقود}}{0.232} \quad (1-2)$$

حيث أن العامل ( 0.232 ) في المقام يمثل نسبة الكتلة للاكسجين في الهواء الجوي ، وباستخدام نسب الاكسجين اللازمة لحرق الكربون والهيدروجين والكبريت فإن المعادلة ( ١ - ٢ ) يمكن كتابتها على النحو :

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th, m} = \frac{2.66 C + 7.94 H_2 + 0.998 S - O_2}{0.232} \quad (2-2)$$

حيث أن  $O_2$  : هي النسبة الكتلية للاكسجين الموجود في الوقود .

**مثال :**

احسب النسبة النظرية هواء / وقود  $(A/F)_{th, d}$  لأحد أنواع الفحم الحجري إذا كانت له النسب التالية عند حرقه ( As - burned ) .

ash ( رماد ) A % 5 , moisture ( رطوبة ) M % 4

$75.62 \% C, 5.01 \% H_2, 6.73 \% O_2, 1.91 \% N_2$

$1.73 \% S, H H V = 31493 \text{ KJ/kg}$

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th, m} = \frac{(2.66) (0.7562) + (7.94) (0.0501) + (0.998) (0.0173) - (0.0673)}{0.232}$$

$$= 10.17 \text{ kg ( air ) / kg ( coal )}$$

مثال :

كانت نتائج التحليل النهائي ( Ultimate analysis ) الوزنية لمكونات احد انواع الفحم الحجري كالاتي :

73.99 % C , 5.39 H<sub>2</sub> , 10.02 % O<sub>2</sub>

1.38 % N<sub>2</sub> , 1.79 S , ash 7.43 %

إحسب كمية الهواء النظرية اللازمة لحرق هذا الفحم بشكل تام .

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th,m} = \frac{(2.66) (0.7399) + (7.94) (0.0539) + (0.998) (0.0179) - 0.1002}{0.32}$$

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th,m} = 9.973 \text{ kg ( air ) / kg ( coal )}$$

في حالة الوقود الغازي ، فإنه من الأسهل التعامل مع نسبة الهواء / الوقود المولية بدلاً من النسبة الوزنية ( الكتلية ) ، فإذا عرفنا ( Z ) بأنها عدد الذرات لعنصر ما ، الموجودة في مول واحد من الوقود فإن هذه القيمة ( Z ) تكون في الواقع مجموع نواتج ضرب الأجزاء المولية ( الكسور المولية ) لمركب الوقود وعدد مولات عنصر معين في هذا المركب .

وكمثال لذلك لو أخذنا الايسوكتين :

( C<sub>8</sub> H<sub>18</sub> isooctane ) -- وقود سائل -- فإن :

$$Z_C = 8 \text{ للكربون}$$

$$Z_H = 18 \text{ للهيدروجين}$$

وللوقود الغازي المؤلف من :

( 50 % CH<sub>4</sub> ) , ( 40 % C<sub>2</sub> H<sub>6</sub> ) , ( 5 % H<sub>2</sub> S ) , ( 5 % O<sub>2</sub> )

فإن :

$$Z_C = (0.5) (1) + (0.4) (2) = 1.3$$

$$Z_H = (0.5)(4) + (0.4)(6) + (0.05)(2) = 4.5$$

$$Z_S = (0.05)(1) = 0.5$$

$$Z_O = (0.05)(2) = 0.1$$

وكما هو الحال بالنسبة لـ  $(A/F)$  الكتلية فإن  $(A/F)$  المولية تعتمد على نسب الأكسجين المولية اللازمة لحرق مول واحد من كل من الكربون والهيدروجين والكبريت وهي :

$$1 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole C}$$

$$0.25 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole H}$$

$$1 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole S}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, mol} = \frac{Z_C + 0.25 Z_H + Z_S - 0.5 Z_O}{0.21} \quad (٢-٢)$$

حيث :

$Z_O$  : عدد مولات الأكسجين في الوقود، والعامل (0.21) في المقام هو نسبة الأكسجين الحجمية في الهواء الجوي .

والعلاقة بين  $(A/F)$  الوزنية و  $(A/F)$  المولية ( الحجمية )

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{28.97}{M W_F} \left(\frac{A}{F}\right)_{th, mol} \quad (٢-٤)$$

حيث :

28.97 : الوزن الجزيئي للهواء .

$M W_F$  : الوزن الجزيئي للوقود .

مثال :

احسب  $(A/F)_{th, mol}$  — المولية — لغاز البترول المسال ( L P G )  
المكون من ( 40 %  $C_3 H_8$  ) و ( 60 %  $C_4 H_{10}$  )

$(A/F)_{th, m}$  — الوزنية — لهذا الوقود .

$$\begin{aligned} Z_C &= 0.4 ( 3 ) + 0.6 ( 4 ) \\ &= 3.6 \text{ moles of C atoms / mole gas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_H &= 0.4 ( 8 ) + 0.6 ( 10 ) \\ &= 9.2 \text{ moles of H atoms / mole gas} \end{aligned}$$

النسبة المولية النظرية هواء / وقود

( Theoretical molar air - fuel ratio )

$$\begin{aligned} \left( \frac{A}{F} \right)_{th, mol} &= \frac{3.6 + 0.25 ( 9.2 ) + 0 - 0}{0.21} \\ &= 28.1 \text{ mole air / mole gas} \end{aligned}$$

نسبة ( هواء / وقود ) المولية مساوية لنسبة ( هواء / وقود ) الحجمية

فإن :

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th, vol} = 28.1 \text{ m}^3 \text{ air / m}^3 \text{ gas}$$

نسبة ( هواء / وقود ) الوزنية :

$$\left( \frac{A}{F} \right)_{th, mol} = \frac{28.97}{(M W)_{Fuel}} \left( \frac{A}{F} \right)_{th, mol}$$

$$(M W)_{Fuel} = 0.44 ( 44.094 ) + 0.6 ( 58.12 ) = 52.51 \frac{\text{kg}}{\text{kg.mol}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = \frac{28.97 \frac{\text{kg air}}{\text{kg. mol air}} * 28.1 \frac{\text{kg. mol air}}{\text{kg. mol fuel}}}{52.51 \frac{\text{kg fuel}}{\text{kg. mol Fuel}}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th, m} = 15.50 \text{ kg air / kg. fuel}$$

### ٣ - ٢ - ٦ القيمة العملية لنسبة الهواء /

#### الوقود : ( Actual air/Fuel ratio )

إن المتطلبات الخمسة التي تضمن حدوث احتراق جيد ( كامل ) هي :

- ١ — خلط جيد للمواد المتفاعلة .
- ٢ — هواء كافٍ .
- ٣ — درجة حرارة كافية .
- ٤ — وقت كافٍ .
- ٥ — كثافة كافية للمزيج لضمان انتشار اللهب .

إن الخلط المثالي ( الكامل ) من الصعب جداً الحصول عليه في عمليات الاحتراق الفعلية ، إلا أنه بالإمكان ضمان حدوث احتراق جيد وذلك بتزويد عملية الاحتراق بالهواء الزائد . وطبيعة نواتج الاحتراق ( الغازات العادمة ) تعتمد على كمية الهواء الزائد ودرجة الخلط ( كفاءة الخلط ) للمواد المتفاعلة . وتضم هذه النواتج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء وثنائي أكسيد الكبريت وبعض المواد التي لم يكتمل احتراقها كجزء من الوقود غير المحترق وأول أكسيد الكربون وهيدروكربونات والدهايدات ونيتروجين ومركبات نيتروجينية كأول أكسيد النيتروجين ( NO ) وثنائي أكسيد النيتروجين ( NO<sub>2</sub> ) . وجميع هذه النواتج باستثناء النيتروجين والماء تعتبر ملوثات للبيئة .

هناك طريقتان للتعبير عن مقدار الهواء المزود في عملية الاحتراق ، وهما :

- ١ — معامل التخفيف ( D C dilution coefficient ) .

٢ — النسبة المئوية للهواء الزائد ( P E A percentage of excess air )

$$D C = \frac{\text{actual ( A/F ) ratio}}{\text{Theor. ( A/F ) ratio}} \quad ( ٥ - ٢ )$$

$$P E A = \frac{( A/F )_{act} - ( A/F )_{th}}{0.01 ( A/F )_{th}} = 100 ( DC - 1.0 ) \quad ( ٦ - ٢ )$$

إن النسبة العملية للهواء / وقد  $( A/F )_{act}$  لا حرق ما ، يمكن تقديرها بواسطة التجارب العملية وذلك بتحليل الغازات العادمة بواسطة أجهزة خاصة مثل جهاز الكروماتوغراف ( Chromatograph ) وجهاز أورسات ( Orsat apparatus ) وغيرها .

### ٣ - ٢ - ٧ مبادئ حرق الفحم الحجري : ( Coal combustion systems )

#### ١ — فرن ستوكر : ( Stoker furnace )

يعتبر فرن ستوكر واحداً من أقدم معدات حرق الفحم الحجري التي لا تزال تستعمل حتى اليوم ، ولكون سعته محدودة فإنه لا يستعمل في تطبيقات القدرة الكبرى ولكنه يستعمل في إنتاج كميات محدودة من البخار في بعض العمليات . يُدخل الفحم المراد حرقه على شبكة ، ثم يتم إحراقه على فرش ( قاعدة ) ثابت ( Stationary bed ) وفي هذا الفرن يحرق الفحم المهشم أو المحطم ( Crushed ) ويتم إدخال جزء من الهواء يسمى ( Primary air ) من أسفل الفرش . يعمل على بدء عملية الاحتراق وتبريد الفرش — في نفس الوقت — ويتم إدخال هواء ثانوي ( Secondary air ) من الجهة العليا للفرش لإتمام عملية الحرق . هناك عدة أنواع من فرن ستوكر من أشهرها :

( ١ ) الشبكة المسلسلة والشبكة المتحركة : ( Chain - grate and traveling grate ) يتكون هذا النظام من شبكة حديدية ومتحركة



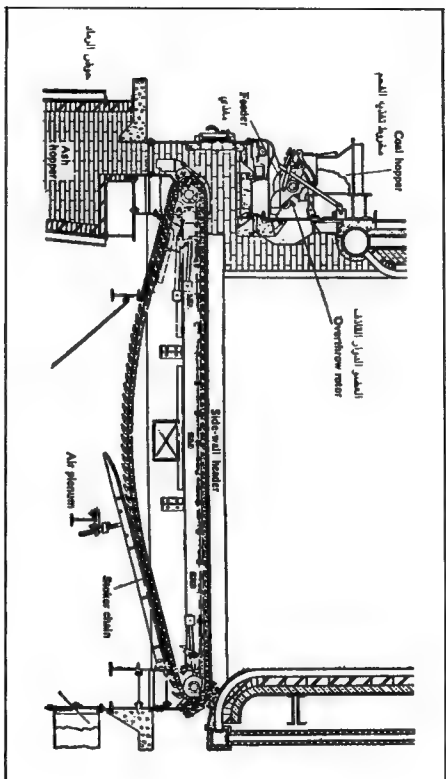
يتراكم عليها الفحم المهشم خلال عملية حرقه. ويعتبر هذا النوع أبسط أنواع أفران ستوكر وأقلها تكلفة ولكنه لا يصلح لحرق الفحم القابل للتكتل (Coking coals) لعدم وجود تقليب أو تحريك كافٍ للفحم المحترق على الشبكة .

(ب) الشبكة المهتزة : ( Vibrating grate ) وهذه مشابهة للشبكة المسلسلة ما عدا أن حركة الشبكة لا تكون في اتجاه ثابت كما هو الحال في الشبكة المسلسلة وكذلك فإن الشبكة تهتز خلال عملية الاحتراق .

(ج) الفرن ذو التغذية السفلية : ( Under feed stoker ) يتم إدخال الفحم إلى قاع الفرش من الأسفل بواسطة أحواض تغذية خاصة .

(د) الفرن — الموزع : ( Spreader stoker ) وهذا أحدث نوع من أنواع أفران ستوكر وأوسعها انتشاراً وذلك لبساطته وسعته العالية وتكلفته القليلة وعدم حساسيته لخصائص الفحم . وفي هذا الفرن يتم قذف الفحم إلى فرش الاحتراق بشكل عرضي ( عمودي على اتجاه حركة الفرش ) بواسطة مجاذيف دوّارة ( Rotating paddles ) أو مراوح أو بواسطة موزع هوائي يُشغل بواسطة هواء أو بخار عالي الضغط .

يبين الشكل ( ٢ - ٥ ) صورة توضيحية للفرن الموزع مع نظام قذف الفحم .



المدخل (ب - ج)  
المدخل الجانبي

## ٢ — أفران الفحم المسحوق ( Pulverized - Coal Furnaces )

تحرق هذه الأفران الفحم المسحوق — بشكل ناعم جداً والمخلوط مع الهواء — بمشعل غازي ( Gaseous torch ) ويمكن لنظام الاحتراق هذا ، أن ينتج قدرات أكبر بكثير من تلك التي ينتجها فرن ستوكر ، وهو ذو استجابة سريعة ( Fast response ) لأنه لا يكون سوى كمية قليلة من الوقود غير المحترق في غرفة الاحتراق ، وفي هذا النظام فإن كمية الهواء الزائدة — المطلوبة للاحتراق — تكون أقل ، مما يقلل من تكون أكاسيد النيتروجين الملوثة (  $NO_x$  ) .

ويمكن بهذه الطريقة حرق عدة أنواع من الفحم وأنواع أخرى من الوقود كالبترول والغاز ، ولوجود هذه الميزات ، فإن هذه الأفران تستعمل بكثرة في محطات القوى التي تستخدم الفحم الحجري كمصدر للوقود .

هناك بعض المساوئ لهذا النظام أهمها أن الفحم المسحوق يحتاج إلى آلة سحق ( Pulverizer ) للفحم . وهذه معقدة التركيب وتحتاج إلى قدرة كبيرة لتشغيلها ويلزمها صيانة دائمة وبنقية ، بالإضافة إلى مشكلة الرماد المتطاير وما يسببه من تلوث ، مما يزيد في متطلبات الصيانة لنظام العادم . كذلك فإن تكاليف إنشاء هذا النظام باهظة ويتطلب أجراماً كبيرة لعملية الاحتراق . وهناك عدة أنواع من آلات سحق الفحم ولكنها جميعاً تعتمد واحدة أو أكثر من عمليات السحق الثلاث الآتية :

١ — التهشيم ( Crushing ) .

٢ — الصدم ( Impact ) .

٣ — الفرك أو الحك ( Attrition ) .

والحك عبارة عن عملية طحن أو سحق للفحم عن طريق احتكاك جزيئين من الفحم بعضهما مع بعض . وتعمل آلة السحق على سحق الفحم وتنعيمه إلى درجة عالية وتجفيفه قبل حرقه .

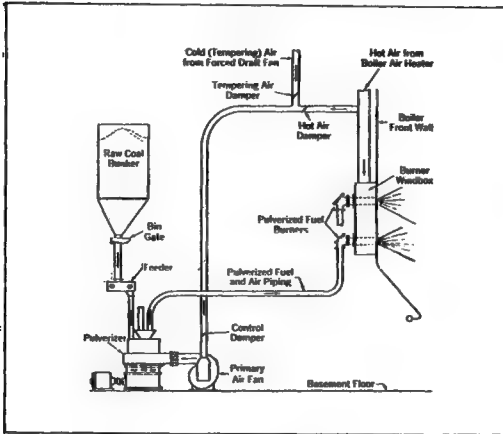
ويتم تسخين الهواء الأولي ( Primary air ) إلى درجة تتراوح ما بين ٢٦٠ — ٣١٥ °س ثم يُضخ بواسطة مروحة مستقلة عبر آلة السحق ليعمل على تجفيف الفحم المسحوق ، ثم ينقل من آلة السحق إلى الحارقة .

يبين الشكل ( ٢ - ٦ ) إحدى أنظمة الحرق المباشر للفحم المسحوق .

### ٣ - الأفران الدوامية : ( Cyclone furnaces )

الفرن الدوامي عبارة عن نظام احتراق يستخدم غرف احتراق مستقلة يصل عددها إلى ١٦ غرفة في المحطات الكبيرة وجميع هذه الغرف تُغذي مرجلاً كبيراً بالغازات الساخنة . ويقوم هذا الفرن بحرق الفحم المهشم حيث يتم إدخال الفحم والهواء الأساسي بشكل مماسي ( من المحيط ) إلى غرفة اسطوانية كبيرة ومعزولة مما يعطيها حركة دوامية خلال عملية الاحتراق .

هناك مشكلتان رئيستان لنظام الاحتراق هذا :



الشكل ( ٣ - ٦ )

نظام حرق مباشر للفحم المسحوق

- ( ١ ) صعوبة حرق الفحم الحجري المحتوي على نسب منخفضة من الكبريت بسبب مشاكل مُخلفات الاحتراق .

(ب) في هذا الاحتراق تكون درجة حرارة الاحتراق عالية مما يتسبب في تكون اكسيد النيتروجين ( $NO_x$ ) التي تعتبر ملوثات رئيسة للبيئة .

#### ٤ — إحتراق الطبقات المخلخلة : ( Fluidized bed combustion )

يعتبر هذا الاحتراق نوعاً حديثاً من أنظمة الاحتراق حيث يتم إدخال كل من الفحم المهشم والرماد والحجر الكلسي (Lime stone) أو الدولوميت (Dolomite) وخلطها جميعاً مع بعضها على فرش الاحتراق ، ثم يتم إدخال تيار هوائي بضغط معين من أسفل الفرش مما يؤدي إلى طفو ( تعليق ) هذه المواد في الهواء وبالتالي تسهيل عملية احتراقها. تُغمس أنابيب المراحل أو الأنابيب المراد تسخينها في الطبقة المخلخلة المشتعلة مما يحقق اتصالاً ( تلامساً ) مباشراً بين أسطح هذه الأنابيب وجزيئات الفحم المشتعل وهذا يؤدي إلى زيادة معدلات انتقال الحرارة بشكل كبير وتقليل المساحة اللازمة لوحدة الحرق ويؤدي كذلك إلى تخفيض درجة حرارة الاحتراق .

الميزة الهامة لهذا النظام من الاحتراق هي القدرة على التحكم في التلوث لأن درجة حرارة الاحتراق المنخفضة ( ٨٢٠ — ٩٥٠ °س ) تمنع تكون اكسيد النيتروجين ( $NO_x$ ) الملوثة للجو، كذلك فإن إضافة الدولوميت ( Calcium carbonate ) أو المغنيسيوم ( magnesium carbonate ) أو الحجر الكلسي ( Calcium carbonate ) تؤدي إلى حدوث تفاعل بين الكالسيوم أو المغنيسيوم وثاني اكسيد الكبريت لتكوين سلفات الكالسيوم أو المغنيسيوم التي هي عبارة عن أملاح صلبة يمكن تجميعها من غرفة الاحتراق ، وبمعنى آخر فإن الكبريت الملوث للجو يتم التخلص منه ، مما يسمح بحرق فحم ذي محتوى عالٍ من الكبريت . والعيب الرئيس لاحتراق الطبقات المخلخلة هو أن هواء الحرق يجب أن يتم تزويده بضغط عالٍ مما يتطلب وجود ضاغط أو مروحة ذات قدرة كبيرة .

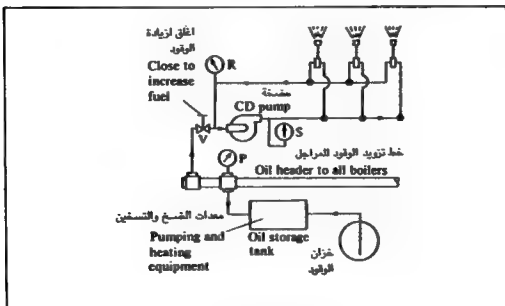
#### ٣ - ٢ - ٨ أنظمة حرق الوقود الزيتي : ( Oil-fired systems )

يتكون نظام حرق الوقود الزيتي ( fuel - oil ) في العادة من خزان للزيت ومعدات ضخ وتسخين وأنبوب تغذية رئيسي للزيت وحارقات ( Burners ) وخط وقود ( زيت ) كما هو مبين في الشكل ( ٢ - ٧ ) .

تُعد عملية حرق الوقود الزيتي أصعب من عملية حرق الوقود الغازي ولكنها

أسهل من عملية حرق الفحم الحجري ، ويجب تحضير الوقود في الحارقة بالنسب الصحيحة وخلطه مع الهواء قبل حرقه .

والتحضير قبل الحرق ضروري — بشكل خاص — في حالة حرق رواسب الوقود الزيتي ( Residual fuel - oil ) وهناك عدة طرق لتحضير الوقود الزيتي للحرق مثل التبخير أو التحويل للحالة الغازية بواسطة تسخين الزيت في الحارقة أو تذرير ( Atomization ) الزيت في تيار هوائي .



الشكل ( ٣ - ٧ )  
المكونات الرئيسية لنظام حرق الوقود الزيتي

وتستخدم عملية التبخير عادة في حالة حرق الوقود الزيتي الخفيف .

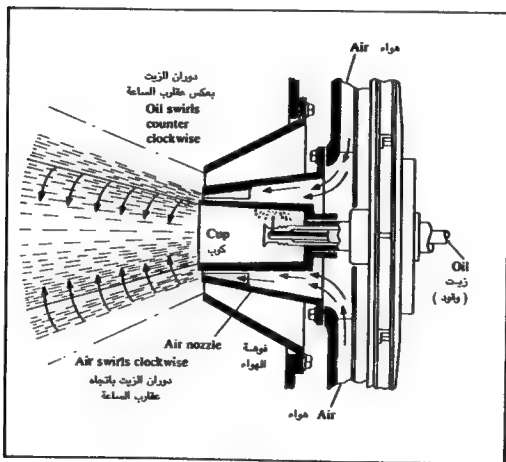
تتم عملية التذرير لقطرات الزيت باستعمال هواء عالي الضغط أو بخار عالي الضغط أو بواسطة تمزيق ( Torn apart ) طبقة الزيت الرقيقة ( Film ) بواسطة قوة الطرد المركزي .

إن عملية التذرير بواسطة الهواء أو البخار ملائمة في حالة الأحمال المتغيرة ويمكن بواسطة هذه العملية تغطية ساعات مختلفة بدون تغيير تركيبية جهاز التذرير .

أما التدوير الميكانيكي فهو مناسب في حالة الأحمال الثابتة والسعات الكبيرة ولكن حدود السعة له محدودة .

يبين الشكل ( ٢ - ٨ ) حارقة الكوب الدوار ( Rotary - cup burner ) .

وتستخدم هذه الحارقة سرعات عالية تصل إلى ٢٥٠٠ دورة / دقيقة للكوب الدوار الأفقي، وذلك لإعطاء الزيت قوة دوامية ( Spin ) تُخرجه من الحافة ( Rim ) إلى تيار الهواء بواسطة قوة الطرد المركزي وهذه الحارقة الميكانيكية لها مجال سعة كبير ( ١ - ١٦ ) .



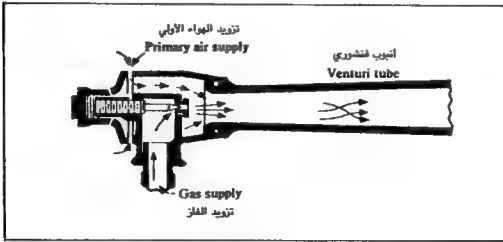
الشكل ( ٢ - ٨ )  
حارقة الكوب الدوار

### ٣ - ٢ - ٩ أنظمة حرق الوقود الغازي :

يعتبر الوقود الغازي من أسهل أنواع الوقود احتراقاً حيث أنه لا يحتاج — في كثير من الأحيان — إلى تحضير قبل عملية الحرق . ويتم إعداد الوقود الغازي للحرق بخلطه مع الهواء بالنسب الصحيحة ، ثم إشعاله مباشرة، ويمكن عمل ذلك بعدة طرق .

#### ١ — الحارقة الغازية الجوية : ( Atmospheric gas burner )

يعتبر هذا النوع أحد الأنواع المألوفة والشائعة الاستخدام . ويتم في نظام الحرق هذا سحب الهواء الأولي اللازم إلى الحارقة بواسطة زخم ( Momentum ) الغاز في عملية تسمى بعملية السقوط ( Aspiration ) . وتُشغّل هذه الأنظمة بشكل اعتيادي باستخدام نسب خلط للهواء الأولي / غاز تتراوح ما بين ٣٠ — ٧٠ ٪ في حين يتم سحب الهواء الثانوي اللازم لإكمال الاحتراق في الهواء الجوي المحيط بالحارقة مباشرة . يبين الشكل ( ٢ - ٩ ) حارقة غازية جوية نموذجية .



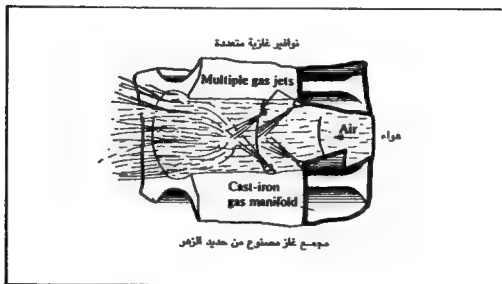
الشكل ( ٢ - ٩ )  
حارقة غازية جوية

#### ٢ — الحارقة الغازية المقاومة للمصهر : ( Refractory gas burner )

يستخدم هذا النوع من الحارقات عادة في مولدات البخار، ويتم في هذا النظام سحب هواء الاحتراق مباشرة من الهواء الجوي المحيط بالحارقة التي



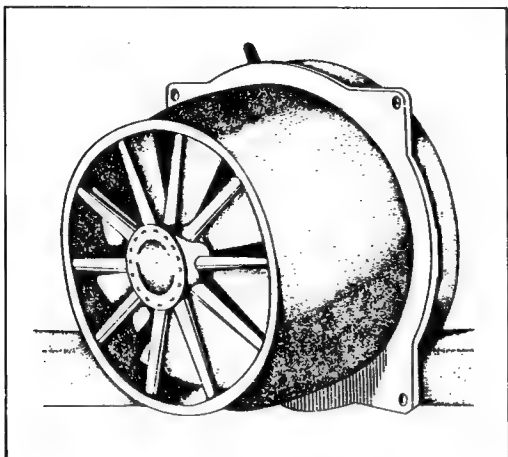
يتخللها عدة ثغوب يتدفع منها الغاز بقوة إلى تيار الهواء مما يؤدي إلى حدوث خلط جيد للغاز مع الهواء .. ويعد ذلك يتدفق الخليط عبر أنبوب معدني قصير مصنوع من معدن مقاوم للصهر لحمايته من درجات الحرارة المرتفعة . الشكل ( ٣ - ١٠ ) يبين إحدى أنواع الحارقات الغازية المقاومة للصهر .



الشكل ( ٣ - ١٠ )  
حارقة غازية مقاومة للصهر

### ٣ — الحارقة مروحية الخلط : ( Fan - mix burner )

في نظام الاحتراق هذا ، يتدفع كل من الهواء والغاز من فوهات مثبتة بزوايا معينة داخل وعاء مجوف دوار على شكل مقلاة يرتبط مع مروحة ، كما هو مبين في الشكل ( ٣ - ١١ ) . وتؤدي قوة اندفاع الهواء والغاز إلى دوران كل من الوعاء والمروحة التي تعمل على خلط الهواء بالغاز خلال دورانها .



الشكل ( ٣ - ١١ )  
الحارقة مروحية الخلط

### ٣ - ٣

## الطاقة الحرارية من الشمس

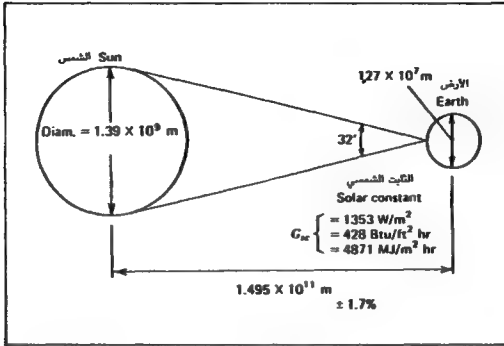
### ٣ - ٣ - ١ مقدمة :

الشمس عبارة عن كرة ملتهبة من الغازات الكثيفة يبلغ قطرها  $1,39 \times 10^9$  متراً ومتوسط بعدها عن الأرض  $1,5 \times 10^{11}$  متراً ودرجة حرارة سطحها الفعالة  $5762 \text{ K}$  (بينما تتراوح درجات حرارتها الداخلية ما بين  $8 \times 10^6 - 40 \times 10^6$  كلفن . يبين الشكل ( ٣ - ١٢ ) رسماً تخطيطياً للعلاقات الهندسية بين الشمس والأرض .

يُعرف الثابت الشمسي ( Solar constant )  $G S C$  بأنه الطاقة المشعة من الشمس في وحدة الزمن والمساقطة على وحدة مساحة معامدة لاتجاه الإشعاع الشمسي وتبعد مسافة مساوية لمتوسط بعد الأرض عن الشمس خارج نطاق الغلاف الغازي للكرة الأرضية . وقد دلت القياسات الحديثة التي أجرتها المركبات الفضائية على أن قيمة هذا الثابت تبلغ حوالي  $1202$  واط / متر مربع ، ونسبة الخطأ في هذه القيمة هي  $\pm 1,5 \%$  (  $G S C = 1353 \pm 1.5 \% \text{ W / m}^2$  ) .

وتعتبر الطاقة الشمسية أكثر مصادر الطاقة توافراً للجنس البشري ، وبالتحديد الطاقة الكهرومغناطيسية التي تبعثها الشمس ، وعلى الرغم من أن الطاقة الشمسية لا تستعمل كمصدر رئيس للطاقة في الوقت الحاضر إلا أن هناك بحوثاً وجهوداً مستمرة لاستغلال أو تسخير الطاقة الشمسية بشكل اقتصادي لتصبح مصدراً رئيساً للطاقة خصوصاً في حقل التبريد والتدفئة للمباني .

يمكن تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى أشكال أخرى للطاقة في ثلاث



الشكل ( ٣ - ١٧ )  
العلاقات المختلفة بين الشمس والأرض

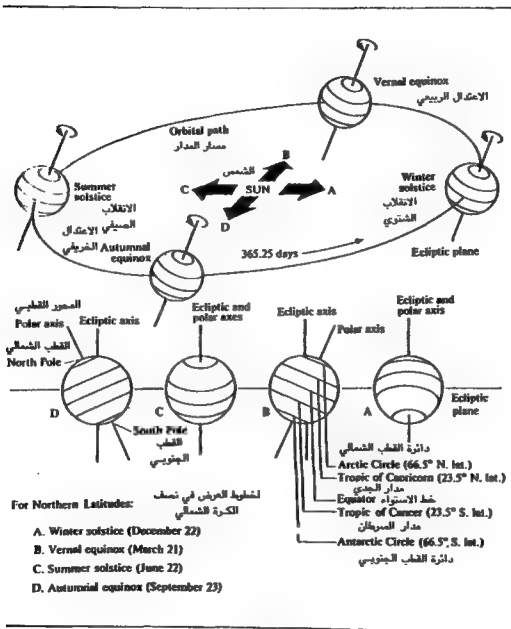
عمليات منفصلة، هي العملية الكيميائية الشمسية ( Helio chemical ) والعملية الكهربية الشمسية ( Helio electrical ) والعملية الحرارية الشمسية ( Helio thermal ) .

فالعملية الكيميائية الشمسية إنما هي عملية التمثيل أو التركيب الضوئي التي هي أساس وقود المستحاثات. والعملية الكهربية الشمسية هي عملية توليد الكهرباء بواسطة الخلايا الشمسية ( Solar cells ) . والعملية الحرارية الشمسية هي عملية امتصاص الإشعاع الشمسي وتحويل هذه الطاقة الإشعاعية إلى طاقة حرارية، وهذه العملية هي العملية التحويلية الوحيدة للطاقة الشمسية التي تصل كفاءتها إلى ١٠٠ ٪ .

### ٣ - ٢ - الأوقات الشمسية :

تدور الشمس حول الأرض في مدار يتخذ شكل القطع الناقص ( Elliptical ) كما هو مبين في الشكل ( ٢ - ١٢ ) وتكون الأرض في أقرب

أوضاعها من الشمس في ٢١ كانون الأول حيث يبلغ بعدها عن الشمس في هذا اليوم حوالي ١,٤٥ × ١١٠ متراً وتكون في أبعد أوضاعها عن الشمس في



الشكل ( ٣ - ١٣ )

دوران الأرض حول الشمس واتجاهاتها المختلفة بالنسبة للأشعة الشمسية

٢٢ جزيران حيث يبلغ بعدها عن الشمس حوالي  $1,04 \times 110$  متراً .

يعرف الوقت الشمسي المتوسط ( Mean Sun Time M S T ) بأنه الوقت الشمسي المحلي ( Local Sun Time L S T ) لو كانت الأرض تدور حول الشمس بسرعة ثابتة، وبما أن مدار الأرض حول الشمس ليس دائرياً فإن هذا يعني أن سرعتها الدورانية حول الشمس ليست ثابتة، وهكذا فإن الشمس تظهر متقدمة أو متأخرة عن الوقت الشمسي المتوسط ( M S T ) وذلك تبعاً للوقت من السنة .

ويسمى الفرق بين الوقت الشمسي الحقيقي — يطلق عليه أيضاً اسم الوقت الشمسي الظاهر ( A S T ) — والوقت الشمسي المتوسط بمعادلة الزمن ( Equation of time ) .

وفي الواقع فإن معادلة الزمن ليست معادلة رياضية وإنما هي عبارة عن معامل تصحيح للزمن تعتمد قيمته على الوقت من السنة . الجدول ( ٢ - ١ ) يعطي بعض القيم لهذا المعامل لأوقات مختلفة من السنة .

ويمكن حساب الوقت الشمسي المتوسط بمعرفة خط الطول المحلي ، وبما أن الأرض تدور  $360^\circ$  في ٢٤ ساعة حول نفسها فإن كل درجة من درجات دورانها تقابل زمناً مقداره  $( 24 \times 60 / 360 )$  أو ٤ دقائق . هناك خط طول وهمي يمر بالمركز التقريبي لكل نطاق زمني Time zone ( لكل ١٥ درجة دورانية للأرض ) يسمى بخط الطول القياسي ( Standard meridian ) لذلك النطاق الزمني وعلى هذا الخط فإن الوقت الشمسي المتوسط يكون مساوياً للوقت المحلي القياسي ( Local Standard time ) ويكون الوقت الشمسي متأخراً بمقدار ( ٤ دقائق / درجة دورانية للأرض ) إلى الشرق من خط الطول القياسي أو متقدماً بنفس المقدار إلى الغرب من هذا الخط عن الوقت المحلي القياسي :

الوقت الشمسي = الوقت المحلي القياسي

$\mp$  [ درجات شرقاً ( + ) أو درجات غرباً ( - ) ]

( ٢ - ٦ ) من خط الطول القياسي [ ٤ دقائق ]

وبمعرفة الوقت الشمسي المتوسط فإنه يمكن حساب الوقت الشمسي الظاهر ( Apparant solar time A S T ) من المعادلة الآتية :

الوقت الشمسي الظاهر

( ٢ - ٧ ) = الوقت الشمسي المتوسط + معادلة الزمن

Parameters for solar calculations (on the 21st day of each month)

Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Day of the year	21	52	80	111	141	173	202	233	263	294	325	355
Declination, degree	-19.9	-10.6	0.0	+11.9	+20.5	+23.45	+20.5	+12.1	0.0	-10.7	-18.9	-23.45
Requision of time, min	-11.2	-13.9	-7.5	+1.1	+3.3	-1.6	-6.9	-2.4	+7.5	+15.4	+13.8	+1.8
Solar noon	Late			Early			Late			Early		
	A, Btu/h·ft <sup>2</sup>	390	385	376	360	350	345	344	341	340	338	337
	B, l/m	0.162	0.164	0.156	0.180	0.196	0.205	0.201	0.177	0.160	0.149	0.149
C, dimensionless		0.058	0.060	0.071	0.097	0.122	0.136	0.136	0.122	0.092	0.073	0.085
												391
												0.142
												0.057

A is the apparent solar irradiation at air mass zero for each month.  
B is the atmospheric extinction coefficient.  
C is the ratio of the diffuse to direct normal irradiation on a horizontal surface.

$$(1 \text{ W} / \text{m}^2 = 0.3173 \text{ Btu} / \text{h} \cdot \text{ft}^2)$$

الجول (J) = 0.3173  
يعرض الإشعاعات الواردة للمحيطات المائية

حيث ان الوقت الشمسي ( A S T ) يستخدم لحساب بعض الزوايا الشمسية اللازمة لحسابات الطاقة الشمسية .

### ٣ - ٣ - ٣ الزوايا الشمسية : ( Solar angles )

#### ١ - زاوية الميل : ( Declination angle )

تعرف زاوية الميل (  $\delta$  ) بأنها الزاوية المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على المحور القطبي في مستوى الأشعة الشمسية ، وتتراوح قيم (  $\delta$  ) ما بين صفر في ٢١ آذار ( الاعتدال الربيعي ) إلى  $+ ٢٣,٤٥$  في ٢٢ حزيران ( الانقلاب الصيفي ) وما بين صفر في ٢٢ أيلول ( الاعتدال الخريفي ) إلى  $- ٢٣,٤٥$  في ٢٢ كانون أول ( الانقلاب الشتوي ) والقيم الشهرية لزاوية الميل (  $\delta$  ) ، معطاة في الجدول ( ١ - ٢ ) . [ انظر الشكل ( ١٢ - ٣ ) .

#### ٢ - زاوية الارتفاع : ( Altitude angle $\beta_1$ )

وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الشمسي والمسقط الأفقي لهذا الشعاع على سطح الأرض عند زاوية خط عرض معين (  $L$  ) .

#### ٣ - زاوية السم : ( Azimuth angle $\alpha_1$ )

وهي الزاوية المحصورة بين المسقط الأفقي للشعاع الشمسي وضط اتجاه الجنوب ( Due-south ) مقاسة باتجاه عقارب الساعة عند زاوية خط عرض معين (  $L$  ) .

ويمكن حساب قيم (  $\beta_1$  ) و (  $\alpha_1$  ) من المعادلتين التاليتين :

$$\sin \beta_1 = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad ( ٨ - ٢ )$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta_1} \quad ( ٩ - ٢ )$$

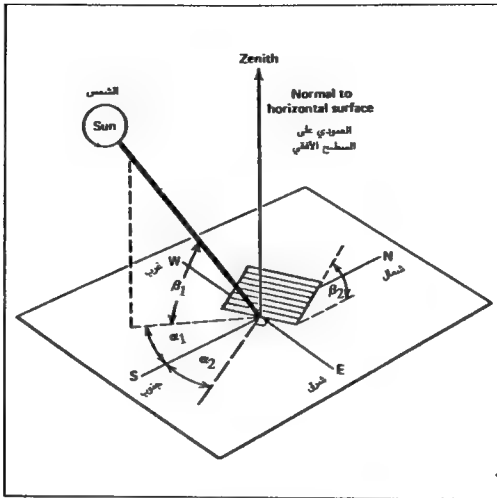
حيث :

$L$  : زاوية خط العرض ( Latitude angle )

$H$  : زاوية الساعة ( Hour angle )

وهي كزاوية السم قيمتها موجبة بعد الظهر وسالبة قبل الظهر ويمكن





الشكل ( ٣ - ١٣ )  
الزوايا الشمسية المختلفة

### حسابها من المعادلة الآتية :

٢٥٠. [ عدد الدقائق قبل ( - ) أو بعد ( + ) الظهر للوقت الشمسي الظاهر

$$(1.2) H = [AST$$

يبين الملحق رقم (١) قيم كل من  $(\alpha_1)$  و  $(\beta_1)$  عند خط عرض  $40^\circ$  شمالاً.

ولحساب الزاوية  $\theta$  المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على سطح

معين فإنه من الضروري تعريف الزوايا الخاصة بهذا السطح شكل ( ٣ - ١٢ ) .

١ - زاوية السمت للسطح (  $\alpha_2$  ) وهي الزاوية المحصورة بين المسقط الأفقي للعمودي على السطح واتجاه مقامه باتجاه عقارب الساعة .

٢ - زاوية الميل للسطح ( Tilt angle  $\beta_2$  ) وهي الزاوية المحصورة بين السطح والمستوى الأفقي .

وتعطى الزاوية (  $\emptyset$  ) بالمعادلة الآتية :

$$\cos \emptyset = \sin \beta_1 \cos \beta_2 + \cos \beta_1 \sin \beta_2 \cos (\alpha_1 - \alpha_2)$$

( ٣ - ١١ )

إذا كانت قيمة (  $\cos (\alpha_1 - \alpha_2)$  ) سالبة فإن هذا يعني أن الأشعة الشمسية لا تسقط على السطح بشكل مباشر .

### ٣ - ٣ - ٤ قيم الإشعاع الشمسي :

إن كمية الإشعاع الشمسي الساقطة على سطح معين هي حاصل ضرب الإشعاع المباشر الساقط على سطح معامد للأشعة الشمسية (  $I_{dn}$  ) و (  $\cos \emptyset$  ) . وتعتمد قيمة الإشعاع العمودي المباشر (  $I_{dn}$  ) على سمك الغلاف الغازي الذي يقطعه الإشعاع بالإضافة إلى كميات بخار الماء والملوثات الموجودة في الجو . ويعبر عادة عن طول المسار الجوي بكتلة الهواء (  $m$  ) التي تعرف بأنها النسبة للكتلة الجوية الموجودة في المسار الفعلي للإشعاع الشمسي المباشر عند موقع معين إلى تلك الكتلة الموجودة في المسار إذا كانت الشمس عمودية على ذلك الموقع (  $\beta_1 = 90^\circ$  ) عند مستوى سطح البحر .

وخارج نطاق الغلاف الغازي للكرة الأرضية فإن (  $m = 0$  ) وفي أي موقع آخر فإن (  $m = 1 / \sin \beta_1$  ) .

يمكن حساب شدة الإشعاع العمودي المباشر (  $I_{dn}$  ) من المعادلة الآتية :

$$I_{dn} = A e^{-(B / \sin \beta_1)} \quad ( ٣ - ١٢ )$$

حيث :

A : شدة الإشعاع الشمسي الكوني الظاهر عند (  $W / m^2$  )

$m = 0$

B : معامل الانطفاء الجوي ( 1 / m )

يبين الجدول ( ٢ - ١ ) القيم الشهرية لكل من ( A ) و ( B ) بينما يبين الملحق رقم ( ٢ ) قيم المركبة العمودية المباشرة (  $I_{dn}$  ) للإشعاع الشمسي عند خطوط عرض مختلفة .

ويعطى تدفق الطاقة الشمسية الكلي (  $I_{t\phi}$  ) على سطح موجود في نطاق الكرة الأرضية عند أي ميل واتجاه لهذا السطح إذا كانت زاوية السقوط له مقدارها (  $\phi$  ) بالمعادلة :

$$I_{t\phi} = I_{dn} \cos \phi + I_{ds} + I_r \quad ( ٢ - ١٢ )$$

حيث :

$I_{dn} \cos \phi$  : المركبة المباشرة للأشعة الشمسية (  $W / m^2$  )

$I_{ds}$  : المركبة المنتشرة أو المبعثرة للإشعاع الشمسي (  $W / m^2$  )

$I_r$  : الإشعاع قصير ( طول - الموجة ) المنبعث من الأسطح الفضائية الأخرى غير الشمس (  $W / m^2$  )

وتعتمد شدة المركبة المباشرة الساقطة على سطح معامد للأشعة الشمسية (  $I_{dn}$  ) على :

١ - الوقت من السنة .

٢ - الوقت من اليوم .

٣ - خط العرض .

٤ - الحالة الجوية .

وتعطى قيمة (  $I_{ds}$  )

$$I_{ds} = C I_{dn} F \quad ( ٢ - ١٤ )$$

حيث ان ( C ) هي النسبة بين المركبة المبعثرة إلى المركبة المباشرة للأشعة الشمسية الساقطة على سطح أفقي ((الجدول ( ٢ - ١ ))، و ( F ) هو معامل الزاوية بين السطح والفضاء، ويمكن حساب قيمة تقريبية لهذا العامل من المعادلة :

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} \quad (١٥ - ٣)$$

وتعطي كمية الطاقة الشمسية ( $E_{t\phi}$ ) التي يمتصها سطح معين بالمعادلة :

$$E_{t\phi} = I_{t\phi} \epsilon \quad (١٦ - ٣)$$

حيث ان ( $\epsilon$ ) هي انبعاثية او امتصاصية السطح للإشعاع الشمسي .

يعطي الجدول (٣ - ٢) قيم الامتصاصية لبعض الأسطح .

المادة	الإشعاع العادي $\epsilon$	الإشعاع الشمسي $\epsilon$
الطوب والاسمنت المصطح	0.85 — 0.95	0.65 — 0.77
الاسفلت	0.90 — 0.95	0.86 — 0.90
ورق السقوف	0.85 — 0.95	0.85 — 0.90
الالمنيوم	0.02 — 0.10	0.10 — 0.40
النحاس	0.02 — 0.15	0.30 — 0.50

الجدول (٣ - ٢)  
إمتصاصية بعض الأسطح للإشعاع الحراري

مثال :

احسب كمية الطاقة الشمسية التي يمتصها سطح إحدى البنايات في الحادي والعشرين من شهر ايار عند الساعة الثانية عشرة ظهراً إذا كانت هذه البناية تقع في مدينة اريد — خط عرض ٢٢ شمالاً وخط طول ٣٦ شرقاً — وكان

السقف يواجه الجنوب ويميل بزاوية مقدارها ٤٥ درجة عن العمودي على سطح الأرض . ( افترض ان السماء صافية )

$L = 33^\circ$  زاوية خط العرض

Longitude =  $36^\circ$  east خط الطول

May 21 at 12 noon

$\beta_2 = 90^\circ - 45^\circ = 45^\circ$  زاوية ميل السطح عن المستوى الأفقي

زاوية السمت للسطح (  $\alpha_2 = 0$  ) لأن السطح يواجه الجنوب .

لنأخذ خط الطول القياسي  $30^\circ$  شرقاً (  $30^\circ$  east ) .

إذاً فالوقت الشمسي المتوسط ( M S T )

$$M S T = 12:00 + [ 36 - 30 ] 0:04 = 12:24$$

( استعملنا الإشارة + لأن خط الطول المحلي لمدينة أريد يقع  $6^\circ$  درجات شرق خط الطول القياسي )

الوقت الشمسي الظاهر ( A S T )

$$A S T = M S T + E O T$$

( معادلة الزمن )

من الجدول ( ٣ - ١ ) في ٢١ أيار

$$\delta = + 20.3$$

$$A = \frac{350}{0.3173} = 1104 \text{ W / m}^2$$

$$EOT = + 3.3 \text{ min}$$

$$B = 0.196 \frac{1}{m}$$

$$C = 0.121$$

$$AST = 12:24 + 3.3 \text{ min} = 12:27.3$$

( H ) زاوية الساعة

$$H = 0.25 [ 12:27.3 - 12:00.0 ] = + 6.82^\circ$$

لاحظ ان الإشارة ( + ) لان ( A S T ) بعد الظهر .

$$\sin \beta_1 = \cos 33^\circ \cos 6.82^\circ \cos 20.3^\circ + \sin 33^\circ \sin 20.3^\circ$$

$$\sin \beta_1 = 0.967$$

$$\beta_1 = 75.92^\circ$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{\cos 20.3^\circ \sin 6.82^\circ}{\cos 75.92^\circ} = 0.4581$$

$$\alpha_1 = 27.26^\circ$$

$$\cos \phi = \sin 75.92^\circ \cos 45^\circ + \cos 75.92^\circ \sin 45^\circ \cos ( 27.26^\circ - 0^\circ )$$

$$\cos \phi = 0.8387$$

$$I_{dn} = 1104 e^{-0.196 / 0.967} = 901.5 \text{ W / m}^2$$

$$I_{ds} = C I_{dn} F$$

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} = \frac{1 + \cos 45^\circ}{2} = 0.853$$

$$I_{ds} = 0.121 \times 0.833 \times 901.5 = 93.1 \text{ W / m}^2$$

$$I_{t\phi} = I_{dn} \cos \phi = I_{ds}$$

( لاحظ ان  $I_r$  قد أهملت )

$$I_{t\phi} = 901.5 \times 0.8387 + 93.1 = 849.15 \text{ W / m}^2$$

$$E_{t\phi} = \epsilon I_{t\phi}$$

من الجدول ( ٢ - ٣ ) فإن قيمة (  $\epsilon$  ) للأسمنت المسلح هي :

$$\epsilon = \frac{0.65 + 0.77}{2} = 0.1$$

$$E_{t\phi} = 0.71 \times 849.15 = 602.9 \text{ W / m}^2$$

مثال :

احسب مقدار الطاقة الشمسية — عند الساعة التاسعة صباحاً في الحادي والعشرين من شهر كانون الثاني — التي يمتصها سقف إحدى البنايات المغطى بورق السقوف والذي يميل عن الأفقي بزاوية مقدارها  $40^\circ$  ويواجه الجنوب الشرقي إذا علمت أن هذه البناية تقع على خط عرض  $23^\circ$  شمالاً وخط طول  $82^\circ$  غرباً . ( افترض أن السماء صافية ) .

$$\text{South east roof } \alpha_2 = -45^\circ$$

$$L = 33^\circ, \beta_2 = 40^\circ$$

من الجدول ( ٢ - ١ ) في الحادي والعشرين من شهر كانون الثاني

$$\delta = -19.9^\circ, EOT = -11.2 \text{ min}$$

$$A = \frac{390}{0.3173} = 1230 \text{ W / m}^2, C = 0.058, B = 0.142 \frac{1}{m}$$

اقرب خط طول قياسي (  $75^\circ$  غرباً )

Nearest Meridian  $75^\circ \text{ W}$

( صباحاً )

$$MST = 9:00 + 0:04 [ 75 - 82 ] = 9 - 0:28 = 8:32 \text{ A. M.}$$

$$AST = 8:32 + ( - 0:11.2 ) = 8:20.2 \text{ A. M.}$$

$$H = [ 8:20.2 - 12:00 ] 0.25 = - 54.8^\circ$$

$$\sin \beta_1 = \cos 30 \cos ( - 19.9 ) \cos ( - 54.8 ) + \sin 30 \sin ( - 19.9 ) = 0.2992$$

$$\beta_1 = 17.4^\circ$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{\cos ( - 19.9 ) \sin ( - 54.8 )}{\cos 17.4} = - 0.805$$

$$\alpha_1 = - 53.6^\circ$$

$$\cos \varnothing = \sin 17.4 \cos 40 + \cos 17.4 \sin 40 \cos [ - 53.6 - ( - 45 ) ]$$

$$\cos \varnothing = 0.8357$$

$$I_{dn} = 1230 e^{- ( 0.142 / \sin 17.4 ) } = 765 \text{ W / m}^2$$

$$F = \frac{1 + \cos 40}{2} = 0.833$$

$$I_{t\varnothing} = I_{dn} [ \cos \varnothing + CF ]$$

$$I_{t\varnothing} = 765 [ 0.8357 + 0.058 \times 0.883 ]$$

$$I_{t\varnothing} = 678.5 \text{ W / m}^2$$

$$E_{t\varnothing} = \epsilon I_{t\varnothing}$$

من الجدول ( ٢ - ٣ )

$$\epsilon = \frac{0.85 + 0.9}{2} = 0.875$$



$$E_{\text{١٥}} = 0.875 \times 678.5 = 593.7 \text{ W / m}^2$$

مثال :

احسب مقدار الطاقة الشمسية التي يمتصها الحائط الغربي لإحدى  
البنائيات الواقعة على خط عرض  $45^\circ$  شمالاً وخط طول  $116^\circ$  غرباً إذا كان هذا  
الحائط يتكون من الطوب .

احسب هذه الطاقة عند الساعة السادسة والنصف مساءً في الحادي  
والعشرين من شهر أيار ( افترض أن السماء صافية ) .

$$L = 45^\circ, \text{ Longitude } 116 \text{ West}$$

$$\text{Time } 6:30 \text{ P. M. May } 21$$

$$\text{Vertical Wall } \beta_2 = 90^\circ, \alpha_2 = 90^\circ \quad \text{بما أن الحائط عمودي ، إذاً:}$$

من الجدول ( ٣ - ١ )

$$\delta = 20.3^\circ, EOT = 3.3^\circ$$

$$A = \frac{350}{0.3173} = 1104 \text{ W / m}^2$$

$$B = 0.196 \frac{1}{\text{m}}, C = 0.121$$

$$MST = 6:30 + 0:04 ( 120 - 116 ) = 6:46.0 \text{ P. M.}$$

$$AST = 6:46.0 + 0:3.3 = 6:49.3 \text{ P. M.}$$

$$H = 0.25 [ 6:49.3 - 12:00.0 ] 0.25 ( 409.3 ) = 102.3^\circ$$

$$\sin \beta_1 = \cos 45 \cos 20.3 \cos 102.3 + \sin 45 \sin 20.3$$

$$\beta_1 = 5.59^\circ$$

$$\sin \alpha_1 \frac{\cos 20.3 \sin 102.3}{\cos 5.95} = 0.921$$

$$\alpha_1 = 67.12^\circ$$

$$\cos \phi = \sin 5.95 \cos 90 + \cos 5.95 \sin 90 \cos (67.12 - 90)$$

$$\cos \phi = 0.97$$

$$I_{dn} = A e^{- (B / \sin \beta_1)} \\ = 167.7 \text{ W / m}^2$$

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} = 0.5$$

$$I_{t\phi} = I_{dn} ( \cos \phi + C F ) = 167.7 ( 0.917 + 0.121 \times 0.5 )$$

$$I_{t\phi} = 257.9 \text{ W / m}^2$$

من الجدول ( ٢ - ٢ )

$$\epsilon = \frac{0.65 + 0.77}{2} = 0.71$$

$$E_{t\phi} = \epsilon I_{t\phi} = 183.1 \text{ W / m}^2$$

## ٣ - ٤

### التطبيقات العملية للطاقة الحرارية من الشمس

يتم استغلال الطاقة الحرارية من الشمس بشكل مباشر بواسطة المجمعات والمركزات واللاقط الشمسية، وأهم التطبيقات في هذا المجال :

#### ١ - اللواقط الشمسية : ( Solar Collectors )

وتستخدم هذه اللواقط لتسخين المياه من أجل الاستعمال المنزلي، ويعتبر هذا التطبيق من التطبيقات ذات درجة الحرارة المنخفضة حيث لا تزيد درجة حرارة الماء المسخن عن ١٠٠°س ، ولكن في بعض اللواقط التي تُستخدم مع مركزات ( Concentrators ) فإن درجة الحرارة قد تزيد عن ١٠٠°س .

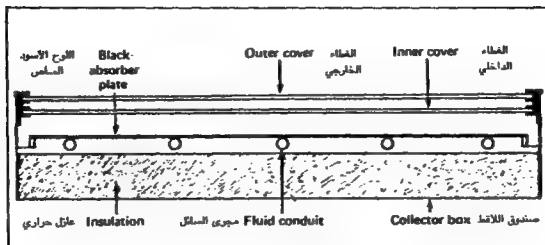
يبين الشكل ( ٣ - ١٤ ) أجزاء اللاقط الشمسي الأساسية .

#### ٢ - الأفراان الشمسية :

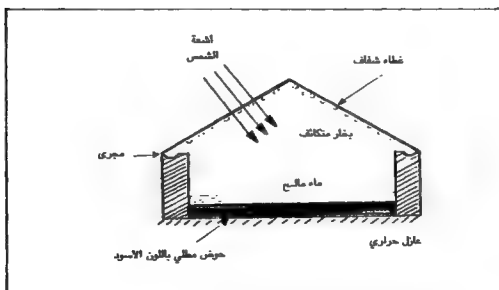
ويمكن بواسطتها الحصول على درجات حرارة مرتفعة تصل إلى ٢٠٠°س أو أكثر وذلك باستعمال المرايا المقعرة والعدسات .

#### ٣ - تحلية وتنقية المياه : ( Water Desalination )

تمرر المياه المراد تحليتها خلال مجمعات شمسية مغلقة وهذه المجمعات عبارة عن أغطية أو سقوف بلاستيكية ( أو غيرها ) شفافة، وعند نهاية هذه السقوف المائلة من الأسفل، مجاري ( Troughs ) لتجميع الماء المقطر. أما قاعدة المجمع ( الحوض Basin ) - الشكل ( ٣ - ١٥ ) - فتكون مطلية باللون الأسود الذي يمتص أكثر من ٩٥ ٪ من الأشعة الشمسية، ويكون الماء المالح موجوداً على القاعدة بعمق ( طبقة ) قليل ويكون الأغطية الشفافة ذات درجات حرارة أقل من درجة حرارة سطح الماء، وذلك بسبب عدم امتصاصها للأشعة الشمسية، ولهذا فإن



الشكل ( ٣ - ١٤ )  
مكونات اللاتط الشمسي



الشكل ( ٣ - ١٥ )  
الاجزاء الاساسية لإحدى وحدات تقطير المياه

الماء المتبخر ( بخار الماء ) يتكاثف على هذه السطوح الباردة نسبياً، وبسبب وجود الميل فإن الماء المتكاثف يسيل باتجاه القنوات أو المجاري في الأسفل التي تعمل على تجميعه .

#### ٤ - تدفئة وتبريد الميفني :

يعد هذا التطبيق من أكثر التطبيقات نجاحاً وأكثرها اقتصاداً في مجالات استخدام الحرارة الشمسية. في هذا التطبيق يتم بناء مباني خاصة سقفوها مكونة من طبقات بلاستيكية لها قابلية تجميع وتركيز الأشعة الشمسية، وتتم من خلال هذه الطبقات أنابيب الماء الذي يسخن ثم ينقل إلى كافة أرجاء المنزل للاستعمال بصورة مباشرة كماء حار أو للاستعمال من قبل نظم التدفئة ، أما في حالة التبريد فهناك حاجة إلى توليد قدرة لتشغيل أنظمة التبريد أو تطوير أنظمة كيميائية خاصة بذلك، ولهذا تعد عملية التبريد أصعب من عملية التدفئة من الناحية التكنولوجية .

#### ٥ - التطبيقات الشمسية :

حيث بالإمكان استعمال مرايا مقعرة بلاستيكية لتركيز الأشعة للحصول على درجات حرارة مرتفعة يمكن استعمالها في الطبخ، وكذلك بالإمكان استعمال غرف خاصة ( مجمعات ) لتجفيف الحبوب والفواكه وأوراق التبغ .

أما أهم الاستعمالات غير المباشرة للطاقة الشمسية فهي استعمال أشعة الشمس لتوليد بخار الماء أو غيره من السوائل في أنظمة مغلقة حيث يمرر هذا البخار خلال توربينات خاصة تولد طاقة ميكانيكية يتم تحويلها بواسطة مولدات لإنتاج الطاقة الكهربائية. وهناك الآن مشاريع كثيرة في العالم لتوليد الطاقة الكهربائية بهذه الطريقة .





الفصل الرابع  
إنتاج الطاقة الميكانيكية





## ٤ - ١

### تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية

#### ٤ - ١ - ١ محركات دورة رانكن

يبين الشكل ( ٤ - ١ ) المكونات الرئيسية لنظام محرك بخاري بسيط، حيث يُبخر السائل في مرجل، ثم يسمح له بالتمدد في ممدد ( Expander ) يُنتج شغلاً ميكانيكياً. ويكون هذا الممدد عادة عبارة عن آلة ترددية أو توربين، وبعد التمدد يعاد البخار إلى المرجل بواسطة مضخة تغذية بعد تكثيفه إلى ماء في المكثف حيث يُصرف جزء بسيط من شغل الممدد في تشغيل مضخة التغذية .

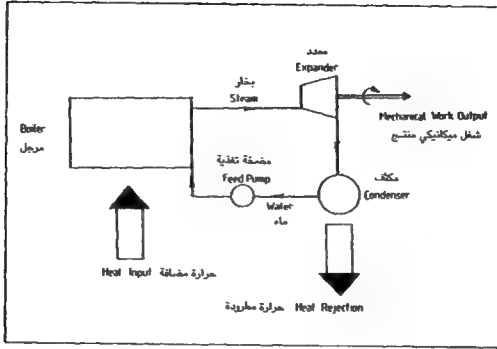
وفي العادة ، فإن الشغل المبذول لتشغيل مضخة التغذية يهمل في حسابات هذه الدورة . ولفهم أداء دورة رانكن البخارية فإنه من الضروري دراسة الحالات ( الأطوار ) المختلفة للبخار .

#### ١ - البخار المشبع : ( Saturated Vapour )

عند وضع كمية من الماء في وعاء مغلق ومفرغ من الهواء فإن الحيز الخاوي فوق الماء سيمتلئ ببخار الماء .

يعتمد الضغط النهائي الثابت الذي يصل إليه بخار الماء على درجة الحرارة فقط ، ويطلق على البخار في هذه الحالة اسم البخار المشبع وعلى ضغط هذا البخار اسم ضغط البخار المشبع .

عند درجة حرارة الغرفة العادية فإن ضغط البخار المشبع للماء يكون منخفضاً . فعلى سبيل المثال عند درجة حرارة مقدارها ١٥°س يكون ضغط البخار المشبع للماء حوالي ١٧٥٠ نيوتن / م<sup>٢</sup> أو ما يعادل ٠,٠١٧ ضغط جوي .



الشكل ( ٤ - ١ )  
المكونات الأساسية لمحرك رانكن البسيط

عند ازدياد ضغط البخار المشبع فإن كثافة البخار تزداد تبعاً لذلك كما هو مبين في الجدول ( ٤ - ١ ) والذي يبين أيضاً العلاقة بين درجة الحرارة وضغط البخار المشبع .

## ٢ - البخار المحمص : ( Superheated Vapour )

إذا عزلنا كمية من بخار الماء المشبع عن سطح الماء ورفعنا درجة حرارتها فإن هذه الكمية في البخار تتصرف كالفاز. في هذه الحالة فإن ضغط البخار لا يعتمد فقط على درجة الحرارة ، بل يعتمد أيضاً على حجم الوعاء المحتوي لهذا البخار .

ويطلق على البخار في هذه الحالة اسم البخار المحمص .

## ٣ - البخار الرطب : ( Wet Vapour )

إذا بُرِيت كمية معزولة من البخار المشبع فإن جزءاً من البخار سيكثف وسيخفض الضغط تبعاً لذلك . يعرف الخليط ( المزيج ) الناتج عن عملية

Temperature °C	Pressure bar	Vapour density kg/m <sup>3</sup>	Vapour specific volume, m <sup>3</sup> /kg
0-01	0-00611	0-00485	206
20	0-023	0-0175	57-8
30	0-0424	0-0304	32-9
40	0-0737	0-053	19
60	0-199	0-13	7-7
80	0-474	0-29	3-4
100	1-01	0-625	1-6
120	2-0	1-14	0-88
150	4-8	2-56	0-39
200	16-0	8-13	0-123
250	40-0	20-4	0-049
300	86-0	46-3	0-0216
350	166	115	0-0087
374-15*	221-20	315	0-00317

\*Critical Point

1 bar = 10<sup>5</sup>Pa

1 atm = 1-013 bar

### الجدول ( ٤ - ١ ) خصائص البخار المشبع

التكثيف الجزئي لبخار الماء باسم البخار الرطب، في حين يطلق اسم كسر الجفاف X ( Dryness fraction ) على نسبة الكتلة للبخار الموجودة في المزيج بحالتها الغازية .

كتلة البخار في الحالة (الطور) الغازية

كسر الجفاف ( X ) =

كتلة الخليط الكلية

للسائل المشبع X = 0

للبخار الرطب 0 < X < 1.0

للبخار المشبع X = 1.0

تعد عملية تسخين مسائل ما عند ضغط ثابت عملية هامة في المحركات الحرارية ، فعند تسخين كمية من الثلج عند ضغط جوي فإن هذه الكمية ستذوب وتتحوّل إلى ماء عند درجة حرارة ثابتة صفر° س ، ثم تبدأ درجة حرارة الماء بالارتفاع حتى تصل إلى ١٠٠° س حيث يبدأ الماء بالتحوّل إلى بخار عند نفس الدرجة حتى تتحوّل الكمية بأكملها إلى بخار ، ثم تبدأ درجة حرارة البخار بالارتفاع بعد ذلك مع استمرار عملية التسخين .

تسمى كمية الحرارة المزودة أو المكتسبة في عملية ما عند ضغط ثابت بالانتالبي. وفي الديناميكا الحرارية يرمز للانتالبي النوعية ( J / kg ) عادة بالرمز ( h ) — يطلق على الانتالبي أحياناً اسم المحتوى الحراري — .

تعرف انتالبي الانصهار أو الحرارة الكامنة للانصهار بأنها كمية الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة للمادة في حالتها الصلبة إلى حالتها السائلة، وتعرف الانتالبي التبخر أو الحرارة الكامنة للتبخر بأنها كمية الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة للمادة من حالتها السائلة إلى حالتها الغازية . الشكل ( ٤ - ١ ) و ( ٤ - ٢ ب ) يبين حالات البخار الثلاثة على مخططي درجة الحرارة — الانتالبي ( T - h ) ودرجة الحرارة — الانتروبي ( T - S ) .

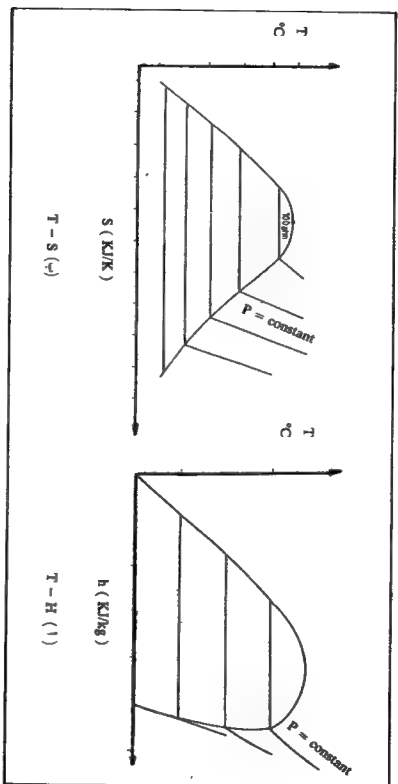
#### ( ١ ) المحرك البخاري الترددي ( Reciprocating steam engine )

يعتبر المحرك البخاري الترددي واحداً من أقدم المحركات العاملة على دورة رانكن .

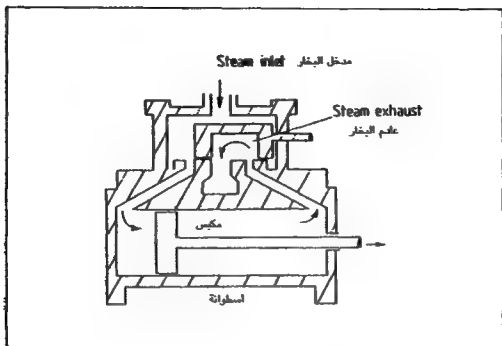
يتكوّن هذا المحرك أساساً من اسطوانة بداخلها مكبس يتحرك حركة ترددية . يتم إنجاز الشغل في هذا المحرك بفعل حركة المكبس الترددية الناتجة عن الفرق في الضغط بين داخل الاسطوانة ( ضغط البخار المرتفع ) وخارجها ( الضغط الجوي) . الشكل ( ٤ - ٢ ) يبين رسماً تخطيطياً لمعدّد مزبوج الصرّح ( Double acting expander ) محرك بخاري ترددي .

#### ( ب ) التوربين البخاري :

كما هو مبين في الشكل ( ٤ - ٤ ) فإن الأجزاء الرئيسة للتوربين البخاري هي المرجل والتوربين والمكثف ومضخة التغذية ، أما الدورة الترموديناميكية فتضم الإجراءات المثالية التالية :



الشكل ( ٤ - ٧ )  
مخطط درجة الحرارة - الإنثالبي ودرجة الحرارة - الإنتروبي



الشكل ( ٤ - ٣ )  
معدن مزيج الحركة

١ - ( ١ → ٢ ) انضغاط ايزونتروبي (  $\Delta S = 0$  ) في المضخة يتطلب شغلاً مقداره (  $W_p$  ) .

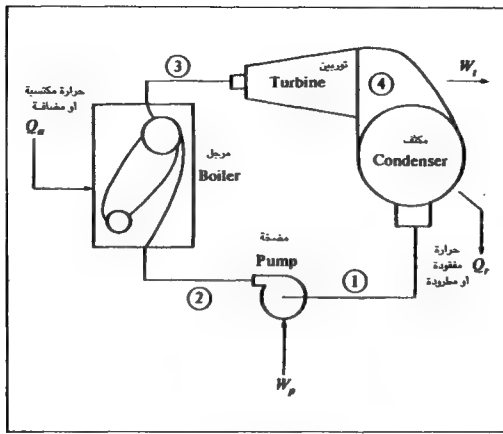
٢ - ( ٢ → ٣ ) اكتساب حرارة من الوسيط العامل في المرجل مقدارها (  $q_R$  ) .

٣ - ( ٣ → ٤ ) تمدد ايزونتروبي في التوربين يُنتج شغلاً مقداره (  $W_t$  ) .

٤ - ( ٤ → ١ ) فقد حرارة في المكثف عند ثبات الضغط مقدارها (  $q_R$  ) .

وهذه الإجراءات المثالية ( ايزونتروبية ) الاربعة مبنية على مخطط ( T - S )  
( الشكل ( ٤ - ٥ ) ) .

وتسمى الدورة الثيرموديناميكية المكونة من هذه الإجراءات بدورة رانكن.  
وكما هو مبين في الشكل ( ٤ - ٥ ) هناك حالتان لهذه الدورة :



الشكل ( ٤ - ٤ )  
الاجزاء الرئيسية ( دورة رانكن )

١ - اكتساب البخار للحرارة في المرجل حتى يصل إلى درجة الإشباع فقط ( 3' ) وفي هذه الحالة فإن الدورة هي ( 1 2 3' 4' ) .

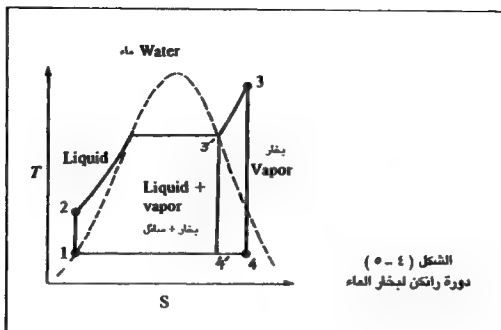
٢ - اكتساب الحرارة في المرجل حتى يصل البخار إلى درجة التخميص ( 3 ) وفي هذه الحالة فإن الدورة هي ( 1 2 3 4 ) .

شغل التوربين :

$$W_t = h_3 - h_4 \text{ or } W_t = h_{3'} - h_{4'} \quad ( ١ - ٤ )$$

شغل المضخة ( اللازم لتشغيل المضخة ) :

$$W_p = h_2 - h_1 \approx v_1 ( p_2 - p_1 ) \quad ( ٢ - ٤ )$$



حيث :

$$v_1 = 1/\rho_1 : \text{الحجم النوعي للسائل ( م}^3 \text{ / كغم ) .}$$

$$\rho_1 : \text{كثافة السائل ( كغم / م}^3 \text{ ) .}$$

$$P : \text{الضغط ( نيوتن / م}^2 \text{ ) .}$$

الشغل الصافي :

$$W_n = W_t - W_p = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad ( ٤ - ٢ )$$

$$\approx (h_3 - h_4) - v_1 (p_2 - p_1)$$

الكفاءة الحرارية :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} \quad ( ٤ - ٤ )$$

أو :

$$\eta_{th} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \quad ( ٤ - ٥ )$$



بإعمال شغل المضخة (  $W_p$  ) :

$$W_n = h_3 - h_4 \quad (٦ - ٤)$$

$$\eta_{th} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \quad (٧ - ٤)$$

مثال :

في دورة رانكن بسيطة كان أقصى ضغط وأقصى درجة حرارة في الدورة هما ٧٠ بار و ٥٤٠°س وأقل ضغط في الدورة هو ٠,١ بار. بافتراض أن جميع الإجراءات مثالية ( أيزونتروبية ) .

وإن :

$$( h_1 = 191.8 \text{ KJ / kg } ) \text{ و } ( h_3 = 3507 \text{ KJ / kg } ) \text{ و } ( h_4 = 2389 \text{ KJ / kg } )$$

$$\text{ و } ( v_1 = 0.101 * 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} ) .$$

احسب :

- ١ — شغل التوربين .
- ٢ — شغل المضخة .
- ٣ — الشغل الصافي .
- ٤ — الحرارة المكتسبة .
- ٥ — الحرارة المفقودة .
- ٦ — الكفاءة الحرارية للدورة .

$$1 — W_t = h_3 - h_4 = 3507 - 2389 = 1118 \text{ KJ / kg}$$

$$2 — W_p = v_1 ( p_2 - p_1 ) = 0.101 * 10^{-2} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$( 70 - 0.1 ) * 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * \frac{1}{1000} = 7.06 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$3 — W_n = W_t - W_p = 1118 - 7.06 = 1110.94 \text{ KJ / kg}$$

$$4 - q_a = h_3 - h_2$$

$$h_2 = h_1 + v_1 (p_2 - p_1) = 191.8 + 7.06 = 198.86 \text{ KJ / kg}$$

$$q_a = 3507 - 198.86 = 3308.14 \text{ KJ / kg}$$

$$5 - q_r = h_4 - h_1 = 2389 - 191.8 = 2197.2 \text{ KJ / kg}$$

$$6 - \eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} = \frac{1110.94}{3308.14} = 0.336$$

يُستخدم الماء كوسيط عامل في دورات القدرة البخارية ( دورات رانكن ) في أغلب الأحيان ولكنه بالإمكان استخدام موائع أخرى كالزئبق والبوتاسيوم والصوديوم والأمونيا وبعض المركبات العضوية .

يمكن تعديل دورة رانكن البسيطة وذلك بإعادة تسخين البخار في المرجل بعد تمدد جزئي في التوربين إلى نفس درجة حرارته السابقة قبل انتهاء التمدد ثم يعاد بعد ذلك إلى التوربين لإكمال عملية التمدد كما هو مبين في الشكل ( ٦ - ٤ ) .

الإجراءات المثالية لدورة إعادة التسخين مبينة في الشكل ( ٧ - ٤ ) على مخطط T - S حيث ان الإجراء ( 4 → 5 ) هو إجراء إعادة التسخين .

شغل التوربين :

$$W_t = ( h_3 - h_4 ) = ( h_5 - h_6 ) \quad ( ٨ - ٤ )$$

شغل المضخة :

$$W_p = ( h_2 - h_1 ) \quad ( ٩ - ٤ )$$

الشغل الصافي :

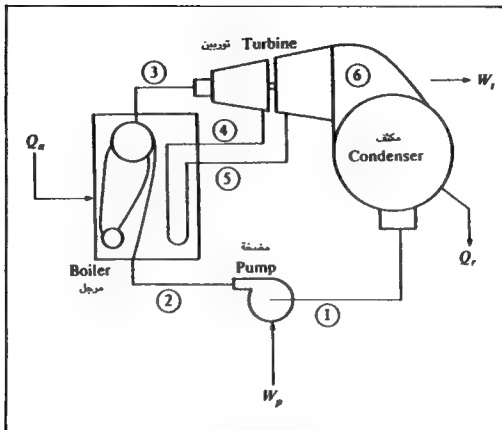
$$W_n = W_t - W_p = h_1 + h_3 + h_5 - h_2 - h_4 - h_6 \quad ( ١٠ - ٤ )$$

أو :

$$W_n = h_3 + h_5 - h_4 - h_6 - v_1 ( P_2 - P_1 ) \quad ( ١١ - ٤ )$$

الكفاءة الحرارية :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} = \frac{h_1 + h_3 + h_5 - h_2 - h_4 - h_6}{h_3 + h_5 - h_2 - h_4} \quad ( ١٢ - ٤ )$$

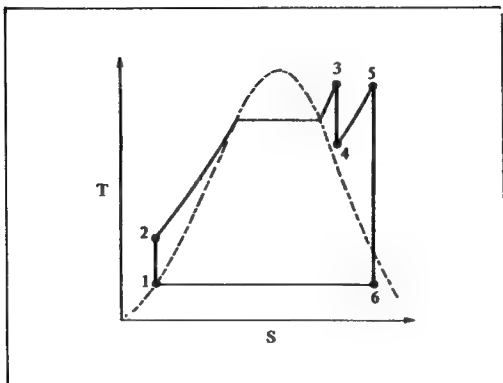


الشكل ( ٦ - ٤ )  
دورة إعادة التسخين ( Reheat Rankine Cycle )

أو :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 + h_5 - h_2 - h_4} \quad ( ١٣ - ٤ )$$

في دورات رانكن الحقيقية هناك ضياعات أو فواقد لا إرجاعية تحدث في كل من إجراء الانضغاط في المضخة وإجراء التمدد في التوربين تؤدي إلى تحويل جزء من الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية وبالتالي زيادة قيم الانشعابي عند مخرجي المضخة والتوربين كما هو مبين في الشكل ( ٨ - ٤ ) على مخطط



الشكل ( ٧ - ٤ )  
دورة إعادة التسخين على مخطط ( T-S )

( T - S ) . وكما نلاحظ من الشكل فإن الإجراءات الحقيقية ( غير المثالية )  
يصاحبها زيادة في قيم الانتروبيا ( S ) .

الشغل الحقيقي للتوربين :

$$W_{ta} = h_3 - h_{4a} \quad ( ١٤ - ٤ )$$

$$= \eta_t ( h_3 - h_4 )$$

الشغل الحقيقي اللازم لتشغيل المضخة :

$$W_{pa} = h_{2a} - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_p} \quad ( ١٥ - ٤ )$$



( Super heat ) البخار تؤدي إلى زيادة الشغل النوعي المنتج ( Specific work out put ) وتقليل المحتوى الرطوبي للبخار في عادم التوربين .

في الواقع العملي فإن درجة الحرارة القصوى للدورة تكون محدودة بدرجة تحمل المواد المعدنية التي يصنع منها كل من المحمص ( Super heater ) ومدخل توربين الضغط المرتفع .

وتستخدم التوربينات البخارية الحديثة درجات حرارة قصوى تتراوح ما بين ٥٢٨ — ٥٩٥°س .

#### ٤ - ١ - ٢ المحركات العاملة على الغاز :

يكون الوسيط العامل في هذه المحركات عبارة عن غاز ، وستتعرف هنا إلى ثلاث محركات عاملة على الغاز :

١ — محرك ستيرلنج .

٢ — التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة .

٣ — التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة .

#### ١ — محرك ستيرلنج : ( Stirling engine )

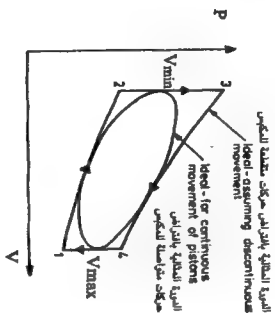
يعتبر محرك ستيرلنج محركاً حرارياً له حسنات وسيئات أي محرك حراري آخر ويمكن تشغيله باستخدام مصادر حرارة مختلفة كاللهب المباشر الناتج عن حرق البترول أو الغاز أو الخشب أو الفحم الحجري وبالإمكان تشغيله أيضاً بالطاقة الشمسية أو النووية .

الشكل ( ٤ - ١٩ ) و ( ٤ - ٩ ب ) يبين دورة ستيرلنج المثالية على مخططي ( P - V ) و ( T - S ) . وإجراءات هذه الدورة هي :

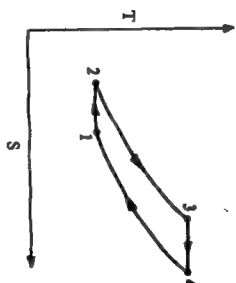
( ٣ → 2 ) تسخين الغاز ( الوسيط العامل ) عند حجم ثابت  $V_{min}$  إلى درجة حرارة مرتفعة مقدارها  $T_3$  وضغط مرتفع مقداره  $P_3$  .

( 3 → 4 ) تمدد الغاز عند درجة حرارة ثابتة (  $T_3$  ) إلى الحجم الأقصى  $V_{max}$  ، وينتج خلال هذا التمدد شغل خارجي .

( 4 → 1 ) تبريد الغاز عند حجم ثابت إلى درجة حرارة منخفضة مقدارها  $T_1$  .



(١٠)



(١١)

الشكل (٩-٤)  
 دورة ستيرلينج الحقيقية  
 على مخططي (P-V) و (T-S)

( 2 → 1 ) انضغاط الغاز عند درجة حرارة ثابتة إلى الحجم الأدنى  $V_{min}$ .

إن هذه الإجراءات يمكن أن تتم باستخدام ترتيب مكون من مكبس واسطوانة وملف تسخين مثلاً ، وفي هذه الحالة فإن المكبس ينجز شغلاً خارجياً عند تمدد الغاز نتيجة لاكتسابه الحرارة من ملف التسخين .

الشكل ( ٤ - ١٩ ) يبين أيضاً دورة ستيرلنغ المثالية ( المنحنى البيضوي الشكل ) في حالة الحركة المستمرة للمكبس ، ويكون الشغل المنجز مساوٍ للمساحة المحصورة داخل المنحنى البيضوي .

يعطي الشغل المنجز في دورة ستيرلنغ المثالية بالمعادلة :

$$W_n = q_h - q_c \quad ( ٤ - ١٧ )$$

والكفاءة :

$$\eta_s = \frac{W_n}{q_h} = \frac{q_h - q_c}{q_h} = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad ( ٤ - ١٨ )$$

حيث :

$q_h$  : الحرارة المضافة للدورة من المصدر الخارجي الساخن .

$q_c$  : الحرارة المفقودة من الدورة للمصدر الخارجي البارد .

وكما نلاحظ فإن الكفاءة النظرية لهذه الدورة هي نفس كفاءة دورة كارنوت. تقاس الطاقة المتولدة / دورة بمقدار المساحة داخل المنحنى على مخطط ( P - V ) ، وفي محركات ستيرلنغ المستخدمة في الحياة العملية فإن مقدار هذه الطاقة / دورة يمكن زيادتها بشكل كبير وذلك برفع قيمة الضغط المتوسط ( Mean pressure ) العامل في الدورة ، وآلات ستيرلنغ الحديثة تستخدم ضغوطاً متوسطة مرتفعة ، وقد يصل الضغط المتوسط العامل إلى ١٠٠ بار أو أكثر .

ويمكن أيضاً تحسين كفاءة محرك ستيرلنغ باستخدام وسيط عامل له موصلية حرارية عالية مثل الهيدروجين والهيليوم بدلاً من الهواء، ولكن المشكلة في



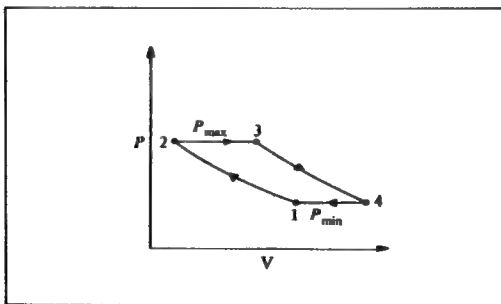
استخدام هذه الغازات أنها ذات تكاليف مرتفعة، ذلك لأن استخدامها يتطلب توافر نظام محكم الإغلاق لمنع تسرب الغاز من أجزاء المحرك المختلفة، في حين أن هذه المشكلة ليست ذات أهمية في حالة استخدام الهواء حيث أنه بالإمكان تعويض كمية الهواء المتسربة باستخدام ضاغط بسيط .

مما يجدر ذكره أن هناك دورة تسمى دورة أريكسون لها كفاءة مساوية لكفاءة دورة كارنوت. وتختلف هذه الدورة عن دورة ستيرلنغ بأن الإجراءين ( 1 → 4 ) و ( 3 → 2 ) يتأان عند ثبات الضغط بدلاً من ثبات الحجم كما هو مبين في الشكل ( ٤ - ١٠ ) .

ولكن استخدام محرك حراري يعمل على دورة أريكسون يعد عملية غير مجدية من الناحية العملية، وذلك لأنه من الصعب اكتساب وفقد الحرارة عند ثبات الضغط خلال مرور الغازات العاملة في التوربين والضاغط .

#### خصائص محرك ستيرلنغ:

تصمم محركات ستيرلنغ بقدرات مختلفة ، فقد تكون هذه القدرات صغيرة



الشكل ( ٤ - ١٠ )  
دورة أريكسون المثالية على مخطط ( P-V )

جداً ( Few watts ) ، وقد تصل إلى قيم مرتفعة تتراوح ما بين ٤٠٠ — ٥٠٠ حصان ( 400 - 500 hp ) في بعض التطبيقات .

يمتاز محرك ستيرلنغ الذي يستخدم الهيليوم كوسيط عامل بأدائه العالي وضغطه المرتفع ودرجة حرارته العاملة المرتفعة التي تصل إلى ٧٠٠°س . وتكون نسب القدرة / الوزن والقدرة / الحجم والفعالية لهذا المحرك مشابهة لمحرك ديزل ينتج نفس القدرة .

وتشمل الصفات العامة لمحرك ستيرلنغ ما يلي :

١ — يعتبر وحدة محكمة الإغلاق مما يسهل عملية التزيت ويقلل متطلبات الصيانة ويعطي عمراً أطول للمحرك . وهناك عامل آخر يساهم في إطالة عمر المحرك وهو خلوه من الصمامات .

٢ — إمكانية تشغيله باستخدام أنواع مختلفة من الوقود .

٣ — انخفاض نسبة الغازات العادمة الملوثة للجو التي يولدها المحرك وذلك بسبب استمرارية الاحتراق، بعكس محرك الاحتراق الداخلي الذي تكون عملية الاحتراق فيه متقطعة.

٤ — عدم تغير العزم كثيراً مع تغير السرعة حيث يحافظ العزم على قيم مرتفعة نسبياً عند السرعات العالية مما يشجع على استخدام المحرك كبديل لمحرك الاحتراق الداخلي في بعض التطبيقات التي تتطلب عزوماً مرتفعة كآلات الجر .

٥ — انخفاض مستوى الضجة والاهتزازات في محركات ستيرلنغ وذلك لغياب الانفجار الناتج عن الاحتراق المفاجيء ( في شوط القدرة ) في الأسطوانة كما يحدث في محرك الاحتراق الداخلي وانخفاض الضجة في العادم بالإضافة إلى أن عدم وجود الصمامات يساهم أيضاً في تقليل الضجة .

التطبيقات العملية لمحركات ستيرلنغ :

على الرغم من ان فكرة المحرك قديمة إلا أنه أصبح يحظى بالاهتمام الزائد حديثاً ، ويستخدم هذا المحرك في التبريد ولكن بشكل غير تجاري ، ولعل اداؤه الذي يضاهي أداء محرك الديزل مع امتيازه عنه بهدوئه النسبي وانخفاض مستويات التلوث يكسبه المزيد من الأهمية في الكثير من التطبيقات العملية . وهناك اتجاه حديث لإنتاج محركات ستيرلنغ بقدرات تصل إلى ١٠٠٠ حصان بسرعات بطيئة لاستخدامها في النقل البري والبحري الثقيل ، وهناك إمكانية واسعة لاستخدام محركات ستيرلنغ بقدرات تصل إلى ١٥ كيلوواط لتوليد الكهرباء في الدول النامية وذلك باستغلال الفحم الحجري أو أخشاب الأشجار كوقود لهذه المحركات .

## ٢ — التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة :

يعمل التوربين الغازي على دورة ذات نظام احتراق خارجي . ومبدأ عمل التوربين الغازي يشبه إلى حد كبير مبدأ عمل التوربين البخاري المشروح سابقاً مع وجود فرق واحد وهو انه في حالة التوربين الغازي فإن الغاز الذي يتم تبريده بعد تمدده في التوربين يبقى في حالته الغازية ولإعادته إلى المُسخن وهو في حالته الغازية فإن ذلك يتطلب شغلاً كبيراً جداً ( اكبر بكثير من الشغل المطلوب من مضخة الماء في التوربين البخاري ) للضاغط .

يعمل التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة على دورة برايتون . والإجراءات المثالية لهذه الدورة مبينة في الشكل ( ٤ - ١١ ) و ( ٤ - ١١ ب ) على مخططي ( P - V ) و ( T - S ) وهي :

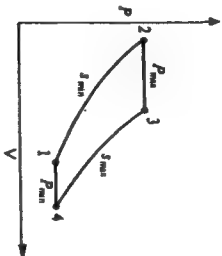
( 1 → 2 ) انضغاط أيزونتروبي في الضاغط .

( 2 → 3 ) اكتساب الحرارة إرجاعياً ( إنعكاسياً ) عند ثبات الضغط .

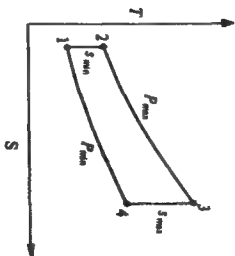
( 3 → 4 ) تمدد الوسيط العامل أيزونتروبياً (  $\Delta S = 0$  ) .

( 4 → 1 ) فقد الحرارة إرجاعياً عند ثبات الضغط .

الشكل ( ٤ - ١٢ ) يبين المكونات الرئيسية للتوربين الغازي ذي الدورة المغلقة وهي على الترتيب : الضاغط (١) المُسخن (مبادل حراري) (٢) والتوربين (٣) والمبرد (مبادل حراري) (٤) .

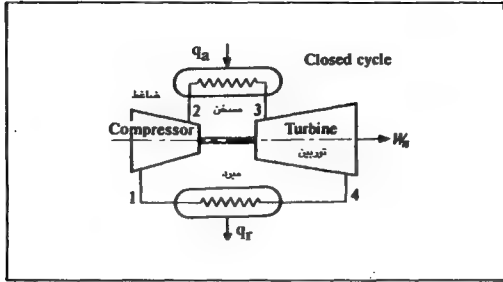


(٢)



(١)

المحرك ( ١١ - ٤ )  
دورة براينتون الحقيقية على محطتي (P-V) و (T-S)



الشكل ( ١٢ - ٤ )  
المكونات الأساسية للتوربين الغازي ذي الدورة المغلقة

إن اكتساب الحرارة في الإجراء ( 2 → 3 ) يؤدي إلى زيادة في حجم الغاز مما يؤدي بدوره إلى زيادة في الشغل المنجز خلال تمدد الغاز في التوربين وهذه الزيادة هي التي تعطي الشغل الصافي المنجز للدورة .

من دورة برايتون المثالية نجد أن :

الحرارة المكتسبة في الدورة :

$$q_a = \dot{m} C_p (T_3 - T_2) \quad ( ١٩ - ٤ )$$

الحرارة المفقودة من الدورة :

$$q_r = \dot{m} C_p (T_4 - T_1) \quad ( ٢٠ - ٤ )$$

حيث :

$\dot{m}$  : معدل تدفق الكتلة للغاز ( kg / s ) .

$C_p$  : الحرارة النوعية للغاز عند ثبات الضغط ( kJ / kg . k ) .

وبتطبيق القانون الأول في الثيرموديناميك فإن الشغل الصافي المنجز :

$$W_D = q_a - q_r \quad (٢١ - \varepsilon)$$

الكفاءة الحرارية للدورة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_r}{q_a} = 1 - \frac{\dot{m} C_p (T_4 - T_1)}{\dot{m} C_p (T_3 - T_2)} \quad (٢٢ - \varepsilon)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (٢٣ - \varepsilon)$$

$$= 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

بما أن إجرائي الانضغاط والتمدد أيزوتروبيين :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (٢٤ - \varepsilon)$$

و

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (٢٥ - \varepsilon)$$

إذاً :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (٢٦ - \varepsilon)$$

من المعادلتين ( ٢٣ - \varepsilon ) و ( ٢٦ - \varepsilon ) نجد أن :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (٢٧ - \varepsilon)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (٢٨ - \varepsilon)$$

$$= 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

حيث :

$r_p = P_2 / P_1$  : نسبة الانضغاط في الضاغط .

$\gamma$  : الاس الايزونتروبي للغاز ( الوسيط العامل ) والهواء فإن  
(  $\gamma = 1.4$  ) .

بما أن :

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} \quad (٢٩ - \varepsilon)$$

فإنه يمكن كتابة المعادلة (  $\varepsilon - ٢٨$  ) على النحو :

$$\eta_{th} = 1 - (r_v)^{1-\gamma} \quad (٣٠ - \varepsilon)$$

حيث :

$r_v = v_1 / v_2$  : نسبة الحجم في الضاغط .

من الغازات الشائع استخدامها في التوربينات الغازية ذات الدورات المغلقة، الغازات الخاملة كالهيليوم والنيون والأرغون حيث أن هذه الغازات ذات قيم عالية للاس الايزونتروبي (  $\gamma$  ) مقارنة مع الاس الايزونتروبي للهواء مما يساهم في رفع كفاءة الدورة . وتزداد كفاءة الدورة أيضاً بزيادة درجة حرارة الغاز الداخل للتوربين (  $T_3$  ) ، وقد أصبح بالإمكان تشغيل التوربينات الغازية بدرجات حرارة دخول (  $T_3$  ) تصل إلى  $١٥٠٠^\circ\text{C}$  ويعود ذلك إلى التطورات الكبيرة التي طرأت على المواد التي تصنع منها ريش التوربين والتي تضم سبائك مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة .

### ٣ — التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة :

في التوربين الغازي ذي الدورة المفتوحة فإن الوسيط العامل هو الهواء الجوي في الضاغط الذي يتحول إلى غازات محترقة ( ثاني أكسيد الكربون + بخار الماء + هواء ) في الحارقة قبل دخوله للتوربين. ويتم فقد الحرارة (  $q_r$  ) إلى الجو مباشرة وليس هناك حاجة لوجود مبادل حراري ( مُبرِد ) كما هو الحال في التوربين ذي الدورة المغلقة . وهكذا ، فإن الغاز العادم ( نواتج الاحتراق ) يطرد من التوربين بعد عملية التمدد إلى الجو ، أي أن الوسيط العامل يتجدد ( يتغير ) باستمرار ولا يعاد للعمل مرة أخرى كما هو الحال في الدورة المغلقة .

ويستعمل هذا التوربين في الطائرات النفاثة ، حيث أن جزءاً من عملية التمدد يتم في الفوهة ( Nozzle ) ، التي تلي التوربين مباشرة ، وكذلك يستعمل توربين الدورة المفتوحة في محطات توليد الكهرباء خصوصاً في حالات الحمل الأقصى ( Peak - Load ) وذلك بسبب السرعة العالية التي يمكن بواسطتها الوصول لإنتاج الحمل الأقصى بواسطة هذا التوربين .

ولعل أهم ميزة لتوربين الدورة المفتوحة على توربين الدورة المغلقة تتمثل في انتقال الحرارة . حيث أنه ليس هناك حاجة لوجود مبرد كما هي مبين في الشكل ( ٤ - ١٣ ) .

الإجراءات المثالية لدورة التوربين الغازي ذي الدورة المفتوحة مبينة في الشكل ( ٤ - ١٤ ) على مخطط ( T-S ) .

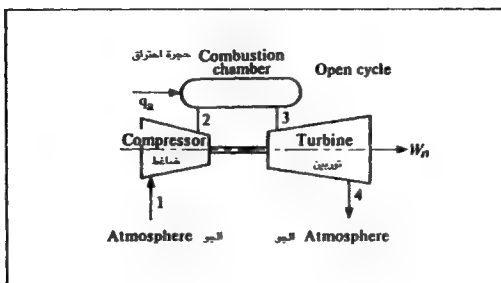
#### مثال :

في دورة برايتون مثالية لتوربين غازي ذي دورة مغلقة كان الضغط ودرجة الحرارة في بداية عملية الانضغاط (  $P_1 = 0.965 \text{ bar}$  ) و (  $T_1 = 15^\circ \text{C}$  ) وكانت نسبة الانضغاط (  $r_p = 6$  ) وكانت أقصى درجة حرارة للدورة (  $T_3 = 961 \text{ K}$  ) .

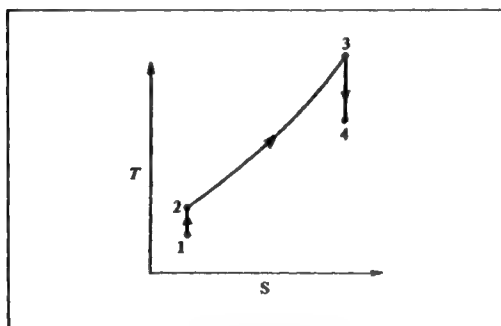
#### احسب :

- ١ — كفاءة الدورة .
- ٢ — الحرارة المكتسبة في الدورة .
- ٣ — الشغل الصافي المنجز في الدورة .





الشكل ( ٤ - ١٣ )  
التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة



الشكل ( ٤ - ١٤ )  
الدورة المثالية للتوربين الغازي  
ذو الدورة المفتوحة على مخطط ( T-S )

افترض ان (  $\gamma = 1.40$  ) ، وان (  $C_p = 1.005 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$  ) للهواء .

$$1 - \eta_{th} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 1 - (6)^{\frac{1-1.4}{1.4}} = 0.4 = 40 \%$$

$$2 - \frac{T_2}{T_1} = (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow T_2 = T_1 (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \\ = (15 + 273) (6)^{\frac{0.4}{1.4}} = 480.5 \text{ K}$$

$$\frac{\dot{q}_a}{\dot{m}} = C_p (T_3 - T_2) = 1.005 (961 - 480.5) \\ = 241.5 \text{ KJ / kg}$$

$$3 - \frac{\dot{W}_n}{\dot{m}} = \dot{q}_a \times \eta_{th} \\ = 241.5 \times 0.4 = 96.6 \text{ KJ / kg.}$$

**مثال :**

محطة توربينية غازية تولّد قدرة مقدارها ٢٠ ميغاواط ( 20 MW ) في ظروف التشغيل الآتية :

درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط  $\approx 20^\circ \text{C}$  وضغطه  $1.2 \text{ بار}$  .

درجة حرارة الغاز الداخل للتوربين  $= 850^\circ \text{C}$  .

بافتراض ان الأس الايزونتروبي للهواء (  $\gamma = 1.4$  ) .

وان الحرارة النوعية عند ثبات الضغط للهواء (  $C_p = 1.005 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$  ) .

**أوجد :**

١ - درجات الحرارة عند كل نقطة من نقاط الدورة .

- ٢ — الشغل المعنجز لكل كغم من الغاز العامل ( الشغل النوعي ) .  
 ٣ — الشغل النوعي لكل من الضاغط والتوربين .  
 ٤ — الكفاءة الحرارية .  
 ٥ — معدل تدفق الكتلة للغاز العامل في الدورة .

$$T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K} \quad \text{— ١}$$

$$T_3 = 850 + 273 = 1123 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 293 \left( \frac{4.2}{0.98} \right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 444.1 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 1123 \times \frac{293}{444.1} = 740.9 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} \frac{q_a}{\dot{m}} &= C_p (T_3 - T_2) = 1.005 (1123 - 444.1) \quad \text{— ٢} \\ &= 682.3 \text{ KJ / kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{q_r}{\dot{m}} &= C_p (T_4 - T_1) = 1.005 (740.9 - 293) \\ &= 450.14 \text{ KJ / kg} \end{aligned}$$

$$\frac{W_a}{\dot{m}} = \frac{q_a}{\dot{m}} - \frac{q_r}{\dot{m}} = 232.16 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_c}{\dot{m}} &= C_p (T_2 - T_1) = 1.005 (444.1 - 293) \quad \text{— ٣} \\ &= 151.86 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\frac{W_t}{\dot{m}} = C_p (T_3 - T_4) = 1.005 (1123 - 740.9) = 384.01 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} \quad \text{— ٤}$$

$$= \frac{232.16}{682.3} = 0.34$$

أيضاً :

$$\frac{W_n}{\dot{m}} = \frac{W_t}{\dot{m}} - \frac{W_c}{\dot{m}} = 384.01 - 151.86 = 232.15 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} = \frac{\text{Power}}{(W_n / \dot{m})} = \frac{20 \times 10^6 \text{ watt}}{232.16 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} \quad \text{— ٥}$$

$$\dot{m} = 86.15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

## ٤ - ٢

### تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية

#### ٤ - ٢ - ١ محرك الاحتراق الداخلي :

يتم تحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود إلى طاقة حرارية بواسطة الاحتراق ( احتراق داخل غرفة مغلقة كاسطوانة السيارة ) حيث تتحول هذه الطاقة الحرارية مباشرة إلى طاقة ميكانيكية في هذه المحركات . تقسم محركات الاحتراق الداخلي من حيث كيفية الإشعال للوقود إلى :

١ - محركات الإشعال بواسطة الشمعات ( Spark ignition ) ، وتشمل محركات البنزين عموماً .

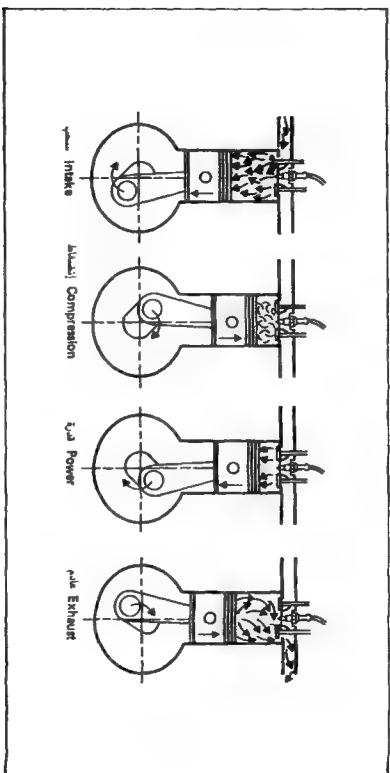
٢ - محركات الإشعال بواسطة الانضغاط ( Compression ignition ) . وتشمل محركات الديزل .

ومعظم محركات الاحتراق الداخلي محركات ترددية ذات مكبس واسطوانة ، ومن ناحية عدد الأشواط وترتيب عملية الإشعال فإن محركات الاحتراق الداخلي تقسم إلى محركات رباعية الأشواط ومحركات ثنائية الأشواط .

كما هو مبين في الشكل ( ٤ - ١٥ ) فإن المحركات رباعية الأشواط يلزمها أربعة أشواط للمكبس لإكمال دورة الاحتراق ( إجراءات الدورة الأربعة ) وهذه الإجراءات هي :

١ - شوط السحب : يكون صمام السحب مفتوحاً وصمام الطرد مغلقاً .

٢ - شوط الانضغاط : تكون صمامات السحب والطرد مغلقة .



الشكل ( ٤ - ١٥ )  
الانواع الاربعة لمحركات الاحتراق الداخلي رباعي الانواع

٣ — شوط القدرة : تكون صمامات السحب والطرء مغلقة أيضاً ويشتعل فيه مزيج الهواء والوقود .

٤ — شوط الطرد : يكون صمام السحب مغلقاً وصمام الطرد مفتوحاً .

في المحرك رباعي الأشواط — كما نلاحظ — فإن عمود العرفق يدور دورتين كاملتين ( لفتين ) لكل دورة احتراق ( أربعة أشواط ) . الدورة التيرموديناميكية النظرية لمحرك الاحتراق الداخلي بالإشعال بواسطة الشمعات هي دورة أوتو المبينة في الشكل ( ٤ - ١٦ ) على مخططي ( P-V ) و ( T-S ) .

تختلف الدورة الحقيقية لمحرك الاحتراق الداخلي عن الدورة النظرية باختفاء القرن كما هو مبين في الشكل ( ٤ - ١٧ ) . ويعود ذلك إلى حركة المكبس المستمرة داخل الأسطوانة ويكون الشغل الحقيقي المنجز خلال دورة احتراق كاملة مساوياً للمساحة المحصورة داخل خريطة المبين ( Indicator diagram ) الموضحة على مخطط ( P-V ) في الشكل ( ٤ - ١٧ ) ، وتكون المساحة المحصورة داخل خريطة المبين أقل من المساحة المحصورة داخل الدورة المثالية على مخطط ( P-V ) — الشكل ( ٤ - ١٦/١ ) — بسبب فواقد الاحتكاك والفواقد الحرارية وغيرها .

تعطى الكفاءة الحرارية لدورة أوتو المثالية بالمعادلة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_r}{q_a} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_v (T_3 - T_2)} \quad ( ٤ - ٢١ )$$

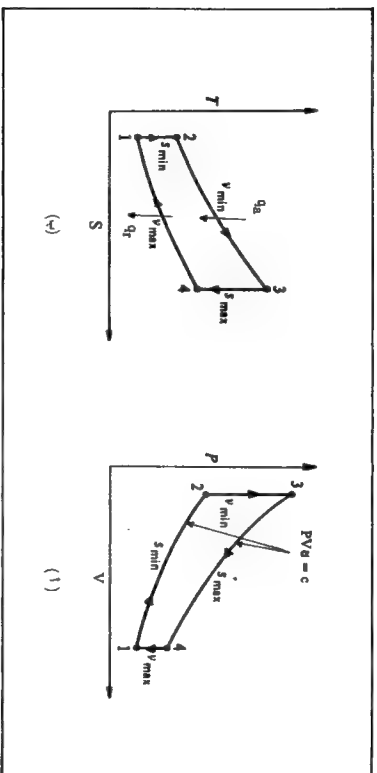
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - (r_v)^{1-\gamma} \quad ( ٤ - ٢٢ )$$

حيث :

$C_v$  : الحرارة النوعية للهواء عند ثبات الحجم .

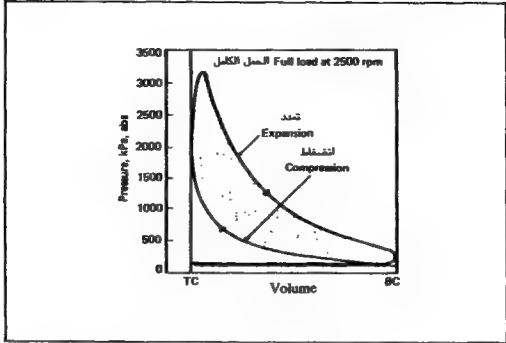
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} : \text{الاس الايزونتروبي للهواء} .$$

$$\text{نسبة الحجم أو نسبة الانضغاط : } r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} . \quad ( \text{Compression ratio} )$$



الشكل (١٩-٤) الشكل (١٩-٤) و (P-V) و (T-S) دورة كارنو المثالية على محطتي





الشكل ( ٤ - ١٧ )  
خريطة الميكن لأحد محركات الاحتراق الداخلي  
رياعي الأشواط عند الحمل الكامل

ويطلق على حجم الاسطوانة عندما يكون المكبس في النقطة الميتة العليا ( T D C ) اسم حجم الخلوص ( Clearance Volume ) فتكون نسبة الانضغاط عبارة عن الحجم الكلي للاسطوانة مقسوماً على حجم الخلوص .

وبفحص المعادلة ( ٤ - ٢٢ ) نجد أن الكفاءة الحرارية لدورة أوتو يمكن زيادتها بزيادة نسبة الانضغاط أو بزيادة قيمة الأس الايزوتروبي ( ٨ ) للوسيط العامل أو كلاهما. ولكن بما أن المقصود هو محرك الاحتراق الداخلي فإن الوسيط العامل يجب أن يكون مزيجاً من الهواء والوقود، لذا فإن قيمة الأس الايزوتروبي ( ٨ ) تبقى ثابتة تقريباً . أما نسبة الانضغاط فإنه ليس بالإمكان زيادتها من دون حدود وذلك لتجنب حدوث ظاهرة الصفع ( Detonation ) والتي تؤدي إلى تقصير عمر المحرك .

يوضح الشكل ( ٤ - ١٨ ) طريقة عمل محرك الاحتراق الداخلي ثنائي الأشواط .

عندما يتحرك المكبس للأسفل في شوط القدرة يكشف فتحة الخروج ( Exhaust port ) لتخرج الغازات المحترقة ( المضغوطة ) وفي نفس الوقت يضغط مزيج الهواء والوقود داخل غطاء المرفق، وباستمرار نزوله للأسفل يكشف فتحة دخول المزيج بين غطاء المرفق والاسطوانة ( Transfer port ) مما يؤدي إلى دخول شحنة الهواء والوقود المضغوطة للأسطوانة .

وفي شوط الانضغاط أثناء حركة المكبس للأعلى فإنه يغلق فتحة الدخول ثم فتحة الخروج ويضغط شحنة الهواء والوقود في الاسطوانة، ثم تقوم شمعة الإشعال بإعطاء الشرارة اللازمة لبدء عملية الاحتراق قبل وصول المكبس للنقطة الميتة العليا ( T D C ) بقليل مما يؤدي إلى نزول المكبس للأسفل في شوط القدرة وتكرر العمليات السابقة .

في هذا المحرك يضاف الزيت اللازم لتزييت عمود المرفق وكراسي التحميل إلى الوقود. وكما نلاحظ فإن الاشتعال لكل اسطوانة يحصل مرة واحدة لكل دورة لعمود المرفق .

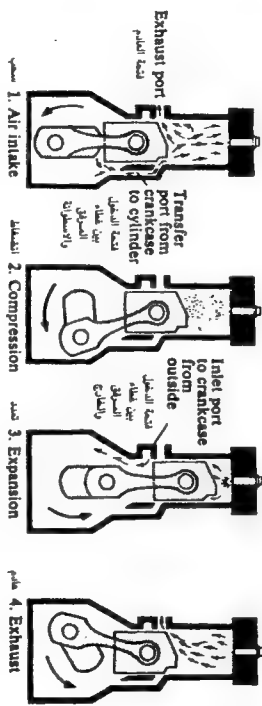
لمحركات الاحتراق الداخلي رباعية الأشواط بعض الميزات على ثنائية الأشواط :

- ١ - اقتصادية أكثر في استهلاك الوقود .
- ٢ - التزييت فيها أفضل .
- ٣ - التبريد فيها أسهل .

أما ميزات المحرك ثنائي الأشواط فهي :

- ١ - عدد الأجزاء المتحركة أقل .
- ٢ - وزن أخف .
- ٣ - تشغيل أنعم ( Smoother operation ) .

هناك محركات ثنائية الأشواط ذات صمامات وأنظمة تزييت مستقلة .



المخطط ( ١٨ - ٤ )  
 المراحل الأربع للحركة الدائرية الداخلية

الشكل ( ٤ - ١٩ ) يبين اوضاعاً متعددة لاسطوانات محركات الاحتراق الداخلي .

في حالة المحركات ذات الاربعة والسنة اسطوانات فينه من المالكوف استعمالها في المحركات المستقيمة ( محركات السيارات ) .

ويستعمل الترتيب على شكل حرف V في حالة المحركات ذات الثماني اسطوانات التي تبرد بواسطة الهواء، ويستعمل وضع المكابس المتعاكسة عادة في محركات الديزل الكبيرة . اما الترتيب على شكل دلتا ( ∇ ) فإنه يستعمل في الصناعات البترولية .

وقد شاع استعمال الترتيب القطري أو المحرك القطري الذي يمتاز بارتفاع نسبة القدرة / الوزن في محركات الطائرات قبل اختراع المحركات النفاثة .

أما أشهر محركات الاحتراق الداخلي الدوارة فهو محرك فائكل ( Wankel engine ) الذي يستخدم قرصاً مثلثي الشكل كعضو دوار ومن ثم تنقل هذه الحركة إلى العمود المقاد بواسطة ترس داخلي .

يعطي هذا المحرك سرعات عالية تتراوح ما بين ٣٠٠٠ - ٨٠٠٠ دورة / دقيقة وهو أخف وزناً وله عدد أقل من الأجزاء المتحركة وأسهل في تصنيعه مقارنة بمحرك الاحتراق الداخلي التبردي .

وأهم مشاكل هذا المحرك هي مشكلة الحواظ ( Sealing problems ) ، والتي تؤدي إلى عدم الاقتصاد في استهلاك الوقود مما يقلل الاهتمام به .

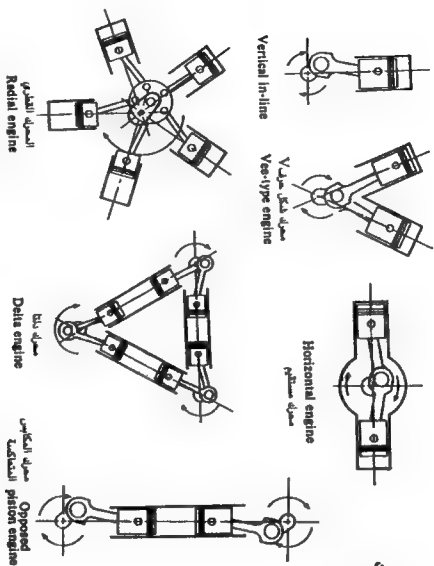
ويعمل هذا المحرك على نفس مبدأ عمل المحرك رباعي الأشواط، وأشواطه هي السحب والانضغاط والاشتعال والقدرة والطرد، كما هو مبين في الشكل ( ٤ - ٢٠ ) .

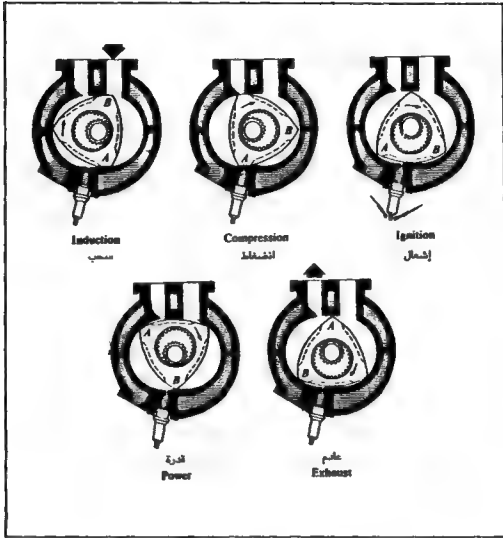
هناك أنواع أخرى مختلفة من محركات الاحتراق الداخلي ولكنه لم يظهر من هذه الأنواع ما هو أفضل من محرك الاحتراق الداخلي التبردي حتى الآن .

#### إداء محرك الاحتراق الداخلي :

هناك عدة معاملات إداء من الشائع استعمالها لدراسة إداء محركات الاحتراق الداخلي، وأحد هذه المعاملات الرئيسية هو القدرة الحصانية القرملية ( BHP ) وتعرف بأنها القدرة المتولدة على العمود المقاد للآلة، وتقاس هذه

السطح ( ١٩ - ٤ )  
 الأوضاع المختلفة للأسطوانة  
 في محركات الاحتراق الداخلي





الشكل ( ٢٠ - ٤ )  
تشواط محرك فكتل الدوار

القدرة بواسطة جهاز مقياس العزوم ( Dynamometer ) وذلك بتطبيق قوة مفرولة خلال ذراع عزم على العمود المقاد حتى يتم إيقافه فتكون القدرة الفرملية اللازمة بالحضان :

$$BHP = (F.R) \frac{w}{735} = \frac{F.R}{735} \left( \frac{2\pi N}{60} \right) = \frac{2\pi NFR}{44100} \quad ( ٢٢ - ٤ )$$

حيث :

N : سرعة الآلة الدورانية ( R P M )

F : القوة الفرملية ( N )

R : ذراع العزم ( m )

اما المعامل الثاني فهو القدرة الحصانية البيانية ( I H P ) وهي القدرة المعطاة للمكبس من الغازات أو السوائل العاملة في الآلة .

والفرق بين ( B H P ) و ( I H P ) هو القدرة الحصانكية الاحتكاكية ( F H P )

$$I H P = B H P + F H P \quad ( ٢٤ - ٤ )$$

والكفاءة الميكانيكية (  $\eta_m$  ) لمحرك الاحتراق الداخلي

$$\eta_m = \frac{B H P}{I H P} \quad ( ٢٥ - ٤ )$$

ومن المتغيرات الهامة في آلات الاحتراق الداخلي هو الضغط الفرمل المتوسط الفعال ( B M E P ) والضغط البياني المتوسط الفعال ( I M E P )

ويعطى الضغط الفرمل المتوسط الفعال بالمعادلة :

$$B H P = \frac{(B M E P) (V_S) N_p}{44100} \quad ( ٢٦ - ٤ )$$

والضغط البياني المتوسط الفعال :

$$I H P = \frac{(I M E P) (V_S) N_p}{44100} \quad ( ٢٧ - ٤ )$$

حيث :

$$V_S = \frac{\pi D^2 L}{4} (m^3) \quad \text{إزاحة الكبس ( الحجم المزاح )}$$

D : قطر الكبس ( m )

L : طول الشوط ( m )

$$Np = \frac{CN}{a} \quad \text{: عدد اشواط القدرة لكل دقيقة}$$

C : عدد الاسطوانات

N : سرعة الالة ( R P M )

a : تساوي (١) للالة ثنائية الاشواط وتساوي (٢) للالة رباعية  
لأشواط .

وتقاس اقتصادية الالة بمعدل استهلاك الوقود النوعي الفرمللي ( B sfc )  
ويعطى بالمعادلة :

$$B \text{ sfc} = \frac{\text{Fuel rate ( kg / hr )}}{B \text{ H P}} \quad ( ٢٨ - \text{ع} )$$

اما الكفاءة الحرارية ( الكلية ) للمحرك فتعطى بالمعادلة :

$$\eta_{th} = \frac{4898}{( B \text{ sfc} ) ( L \text{ H V} )} \quad ( ٢٩ - \text{ع} )$$

حيث :

L H V : القيمة الحرارية ( المحتوى الحراري ) الدنيا للوقود  
( KJ / kg )

وتعرف الكفاءة الحجمية لمحرك الاحتراق الداخلي كالاتي :

$$\eta_v = \frac{\text{حجم الهواء الداخل للاسطوانة عند الظروف الجوية}}{\text{إزاحة المكبس}} \quad ( ٤٠ - \text{ع} )$$

وتكون قيم الكفاءة الحجمية مرتفعة الاحتراق الداخلي وقد تزيد قيمة الكفاءة  
حجمية عن ١٠٠ ٪ في حالة استخدام الشحانات ( Super chargers ) .



**مثال :**

في محرك ثنائي الأشواط ( ذات اسطوانتين ) كانت سرعة المحرك ( 600 R P M ) وقطر المكبس ( 110 m m ) وطول الشوط ( 140 m m ) إذا كانت ( I H P = 20 ) والكفاءة الميكانيكية تساوي ( 0.82 ) . احسب ( I H P ) و ( B M E P ) .

$$\eta_m = \frac{B H P}{I H P} \Rightarrow 0.82 = \frac{B H P}{20} \Rightarrow B H P = 16.4$$

$$B H P = \frac{(B M E P) (V_S) (N_P)}{44100}$$

$$V_S = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{\pi \left(\frac{110}{1000}\right)^2 \times 0.14}{4} = 0.00133 \text{ m}^3$$

$$N_P = \frac{C N}{a} = \frac{2 \times 600}{1} = 1200 \frac{\text{Power Stroke}}{\text{minute}}$$

$$16.4 = \frac{(B M E P) (0.00133) (1200)}{44100}$$

$$\begin{aligned} B M E P &= 453158 \text{ Pascal} \\ &= 453 \text{ Kpa} \\ &= 4.53 \text{ bar} \end{aligned}$$

**مثال :**

محرك احتراق داخلي ذو ثمانتي اسطوانات ورباعي الأشواط سرعتة ( 2400 R P M ) وقطر كراسه ( 120 m m ) وطول الشوط ( 125 m m ) ، إذا كان ( B M E P = 820 K P a ) .

احسب ( B H P ) ، وإذا كانت الكفاءة الميكانيكية هي ( 0.85 ) احسب ( I H P )

$$B H P = \frac{(B M E P) (V_S) (N_p)}{44100}$$

$$V_S = \frac{\eta D^2 L}{4} = \frac{\eta (0.12)^2 (0.125)}{4} = 0.00144 \text{ m}^3$$

$$N_p = \frac{C N}{a} = \frac{8 \times 2400}{2} = 9600 \frac{\text{Power stroke}}{\text{minute}}$$

$$B H P = \frac{820 \times 10^3 \times 0.0014 \times 9600}{44100} = 252.4$$

$$I H P = \frac{B H P}{\eta_m} = \frac{252.4}{0.85} = 296.94$$

مثال :

في دورة أوتو مثالية كانت درجة الحرارة في بداية إجراء الانضغاط في دورة أوتو مثالية كانت درجة الحرارة في بداية إجراء الانضغاط (  $T_1 = 50^\circ\text{C}$  ) والضغط (  $P_1 = 0.97 \text{ bar}$  ) ونسبة الحجم هي ( 5:1 ) .

إذا كانت الحرارة المكتسبة في الدورة تساوي (  $930 \text{ KJ / kg}$  ) احسب :

١ — درجة الحرارة العظمى .

٢ — الكفاءة الحرارية .

٣ — الشغل المنجز لكل كغم من الغاز العامل ( الشغل النوعي ) .

افترض ان (  $C_v = 0.717 \frac{\text{KJ}}{\text{kg.K}}$  ) وان (  $\gamma = 1.4$  ) للغاز العامل .

$$T_1 = T_2 \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma} - 1 = (50 + 273) \left( \frac{5}{1} \right)^{1.4} - 1 = 615 \text{ K} \quad \text{— ١}$$

$$q_a = C_v (T_3 - T_2) = 0.717 (T_3 - 615)$$

$$920 = 0.717 (T_3 - 615)$$

$$T_3 = 1910 \text{ K} = 1637^\circ\text{C}$$

$$\eta_{th} = 1 - (r_v)^{1-\gamma} = 1 - (5)^{1-1.4} = 0.475 \quad \text{— ٢}$$

$$W_n = q_a \times \eta_{th} = 930 \times 0.475 = 442 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \quad \text{— ٣}$$

— محركات الاشتعال بواسطة الانضغاط (C I) — محركات الديزل :

تعرف محركات الاحتراق الداخلي ذات الانضغاط — الاحتراق (C I) بمحركات الديزل، وتصمم هذه المحركات عادة بنسب انضغاط تتراوح ما بين ١٠:١٤ — ١٠:٢٢ ففي شوط الانضغاط يرتفع الضغط للهواء إلى مقدار يصل إلى ( 3500 Kpa ) أو أكثر وتصل درجة الحرارة إلى ( 540°C ) وقبل وصول المكبس إلى النقطة الميتة العليا يحقن الوقود في الاسطوانة ( غرفة الاحتراق ) ويحدث الاحتراق بسرعة نتيجة لوصول المزيغ إلى ضغط ودرجة حرارة تسمحان بحدوث الاشتعال الذاتي للوقود ( الديزل ) . وتتراوح ضغوط حقن الوقود ما بين ٧ — ٧٠ ميغاباسكال . وتصنف محركات (C I) حسب سرعتها إلى محركات ذات سرعات منخفضة ( أقل من 500 R P M ) وذات سرعات متوسطة ( 500-1000 R P M ) وذات سرعات عالية ( أكثر من 1000 R P M ) .

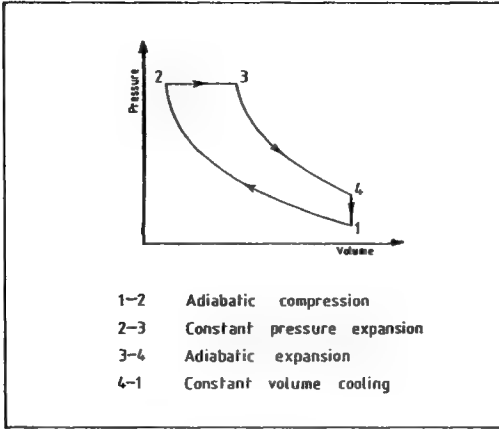
الدورة النظرية لمحركات الاشتعال بواسطة الانضغاط ، هي دورة ديزل المبينة في الشكل ( ٤ - ٢١ ) على مخطط ( P-V ) ، ويبين الشكل ( ٤ - ٢٢ ) الدورة الحقيقية لمحركات الاشتعال بواسطة الانضغاط على مخطط ( P-V ) .

وتعطي الكفاءة الحرارية لدورة ديزل المثالية ( النظرية ) بالمعادلة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_v (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)} \quad ( ٤ - ٤١ )$$

ومنها فإن :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{r} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad ( ٤ - ٤٢ )$$

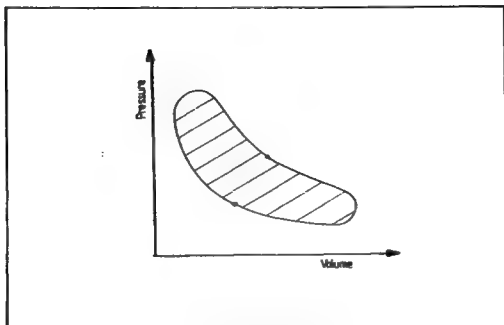


الشكل ( ٤ - ٢١ )  
دورة ديزل المثالية على مخطط ( P-V )

مثال :

في دورة ديزل مثالية كانت درجة الحرارة في بداية عملية الانضغاط  $(60^{\circ}\text{C})$  والضغط  $(98.5 \text{ KN} / \text{m}^2)$  وكان أقصى ضغط في الدورة  $(45 \text{ bar})$  والحرارة المكتسبة  $(q_g = 580 \text{ KJ} / \text{kg})$  . احسب :

- ١ — نسبة الانضغاط .
- ٢ — درجة الحرارة في نهاية عملية الانضغاط .
- ٣ — درجة الحرارة في نهاية عملية الاحتراق .
- افترض ان  $(C_p = 1.003 \text{ KJ} / \text{kg.K})$  وان  $(\gamma = 1.4)$  .



الشكل ( ٤ - ٢٢ )  
خريطة الميكن. الاشتعال بواسطة الانضغاط

$$1 - P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left( \frac{45}{0.985} \right)^{\frac{1}{1.4}} = 15.53$$

$$2 - \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma - 1}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} = (60 + 273) (15.53)^{1.4 - 1}$$

$$= 992.3 \text{ K}$$

$$3 - q_a = C_p (T_3 - T_2)$$

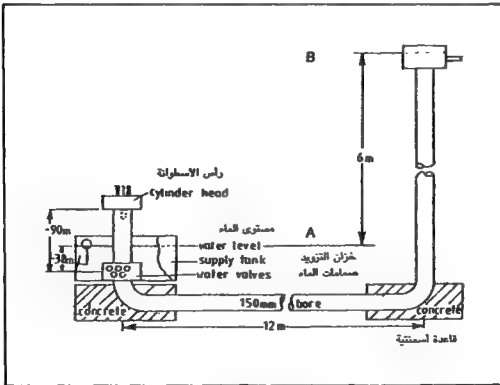
$$580 = 1.003 (T_3 - 992.3)$$

$$T_3 = 1570.6 \text{ K}$$

#### ٤ - ٢ - ٢ مضخة همفري : ( Humphrey Pump )

في مضخة همفري ، تعمل طاقة الغازات المحترقة ( الغازات المتعددة اثناء الاحتراق) على ضخ المياه مباشرة من دون الحاجة إلى استخدام مكبس واسطوانة لتحويل الطاقة الحرارية والضغط الناتجين عند احتراق الغاز ( الوقود ) إلى طاقة ميكانيكية دورانية كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي .

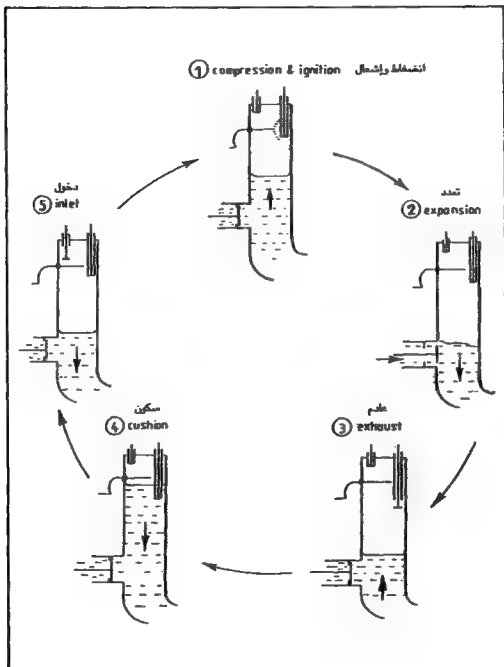
وكما هو مبين في الشكل ( ٤ - ٢٣ ) فإن هذه المضخة تتكون اساساً من أنبوب على شكل حرف ( U ) يتأرجح فيه عمود من الماء طلوغاً ونزولاً عند حرق شحنة من الغاز والهواء بشكل دوري . ويقوم عمود الماء بخزن الطاقة مؤقتاً — كالحداقة — أثناء حركته المتأرجحة .



الشكل ( ٤ - ٢٣ )

رسم تخطيطي مبسط لمضخة همفري يبين المكونات الأساسية للمضخة التي تقوم برفع الماء من المستوى (A) إلى المستوى (B)

الشكل ( ٤ - ٢٤ ) يبين مقطعاً مكبراً لمنطقة سحب الماء والاسطوانة



الشكل ( ٤ - ٢٤ )  
الاشواط الأربعة لمضخة مغمري

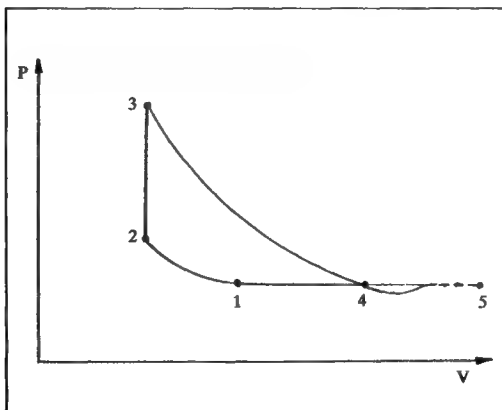
وصمامات المضخة المختلفة بالإضافة إلى أشواط الأداء الأربعة للمضخة وهي :

( 2 → 1 ) انضغاط المزيج من الغاز والهواء بفعل رجوع عمود الماء للأعلى في الاسطوانة نتيجة الاستمرارية في الحركة .

( 3 → 2 ) اشتعال المزيج وارتفاع الضغط فوق عمود الماء .

( 5 → 4 → 3 ) تمدد الغاز المحترق وتحرك عمود الماء هبوطاً في الاسطوانة مما يؤدي إلى انخفاض الضغط داخل الاسطوانة تحت الضغط الجوي في نهاية الشوط وهذا بدوره يؤدي إلى فتح صمام دخول الماء واندفاع الماء من الخزان إلى الاسطوانة .

( 1 → 5 ) رجوع عمود الماء بفعل كمية تحركه التي يمتلكها مما يؤدي إلى



الشكل ( ٤ - ٢٥ )  
دورة تكثفون



خروج الغازات العادمة من صمام الخروج ، ويستمر عمود الماء بالارتفاع حتى يصل إلى مستوى صمام العادم فيقلقه .

الدورة النظرية ( المثالية ) لمضخة همفري ، هي دورة إتكسون المبينة في الشكل ( ٤ - ٢٥ ) ، والكفاءة النظرية لدورة إتكسون تصل إلى ٤٥ ٪ ولكن الكفاءة الفعلية ( العملية ) لمضخة همفري تتراوح ما بين ١٠ — ٢٠ ٪ وذلك بسبب الفواقد الحرارية المختلفة من الانابيب والاسطوانة ( المضخة ) إلى المحيط الخارجي بالإضافة إلى أن جزءاً كبيراً من الطاقة الحرارية تمتصه قطرات الماء الموجودة على جدران الاسطوانة الداخلية عند احتراق مزيج الهواء والوقود الغازي .

## ٣ - ٤

### التوربينات المائية

تقوم هذه التوربينات بتحويل طاقة الوضع في المياه إلى شغل مفيد ( طاقة ميكانيكية ) ، ويمكن تصنيف التوربينات المائية إلى توربينات رد فعل ( Reaction ) وتوربينات دفعية ( Impulse ) والتوربينات مختلطة الجريان ( Mixed flow ) ومن حيث اتجاه الجريان في التوربين يمكن تصنيفها إلى توربينات ذات جريان قطري ومحوري ومختلط .

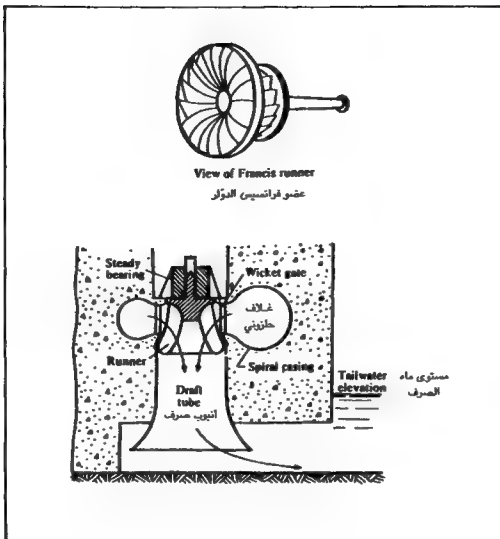
من أشهر التوربينات الرد فعلية توربينات فرانسيس — الشكل ( ٢٦ - ٤ ) — وكابلان — الشكل ( ٢٧ - ٤ ) — .

ومن أشهر التوربينات الدفعية توربين ( دولاب ) بلتون — الشكل ( ٢٨ - ٤ ) — .

١ — تستعمل التوربينات الدفعية مثل بلتون في حالة الارتفاعات العالية ، التي تزيد عن ٥٠ متراً ويعتبر هذا التوربين ذو كفاءة تحويلية عالية .

٢ — وتستعمل توربينات رد الفعل مثل توربينات فرانسيس ذات الجريان القطري والمختلط في حالة الارتفاعات المتوسطة ( ٥ — ٤٦٠ متراً ) .  
وتعتبر توربينات فرانسيس ذات كفاءة تحويلية — من طاقة مائية إلى ميكانيكية — ممتازة عند الأحمال العادية ولكنها ذات كفاءة منخفضة في حالة الأحمال الجزئية ( Part Load ) .

أما توربين كابلان ذو الجريان المحوري فإنه يستعمل في حالة الارتفاعات المنخفضة ( ٢ - ٢٠ متراً ) وهو ذو كفاءة تحويلية عالية في حالة الأحمال

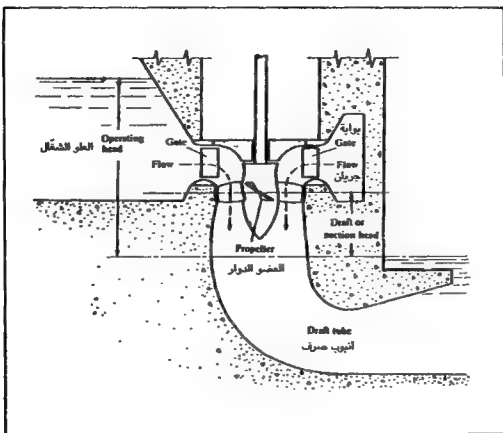


الشكل ( ٤ - ٢٦ )  
توربين فرانسيس

التصميمية ( Design Load ) وذو كفاءة منخفضة في حال الاحمال الجزئية  
أو معدلات السريان المنخفضة .

تعطى القدرة المائية ( Water power ) للتوربينات المائية بالمعادلة :

$$WP = \frac{\rho Q H}{1000} \quad ( ٤ - ٤٢ )$$



الشكل ( ٤ - ٢٧ )  
توربين Kaplan

حيث :

$\rho$  : كثافة الماء (  $1000 \text{ kg / m}^3$  )

$g$  : تسارع الجاذبية الأرضية (  $9.81 \text{ m / s}^2$  )

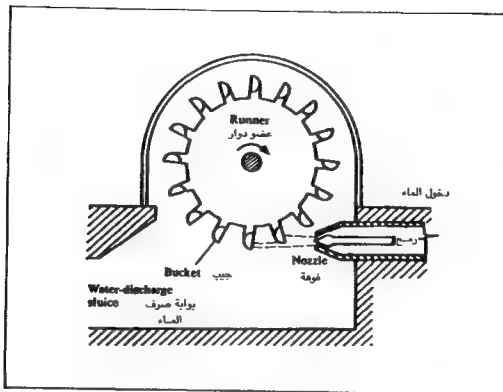
$Q$  : الصرف الحجمي (  $\text{m}^3 / \text{s}$  )

$H$  : ارتفاع الماء الكلي على التوربين (  $\text{m}$  )

الكفاءة الكلية للتوربين :

$$\eta_t = \frac{BP}{WP}$$

( ٤٤ - ٤ )



الشكل ( ٤ - ٢ )  
توربين ( دولاب ) بلفون

حيث :

BP : القدرة الفرملية ( K W )

وتعطى القدرة الفرملية بالمعادلة :

$$BP = \frac{FR \pi N}{30000} \quad ( ٤٥ - ٤ )$$

N : سرعة التوربين الدورانية ( RPM )

F : القوة الفرملية ( N )

R : ذراع الفرملة ( m )

مثال :

في توربين بلتون كان ارتفاع الماء المتوافر هو ( 150 m ) والصرف  
( 0.6 m<sup>3</sup> / s ) وإيجاد القدرة الفعلية لزمت قوة مقدارها ( 30 K N ) لإيقاف  
التوربين خلال ذراع عزم طولها ( 0.5 m ) عندما كانت سرعة التوربين  
( 450 R P M ) . احسب الكفاءة التحويلية الكلية للتوربين .

$$W P = \frac{P g Q H}{1000} = \frac{1000 * 9.81 * 0.6 * 150}{1000} = 882.9 \text{ K W}$$

$$B P = \frac{F R \pi N}{30000} = \frac{30 * 10^3 * 0.5 * \pi * 450}{30000} = 706.8 \text{ K W}$$

$$\eta_t = \frac{B P}{W P} = 0.8$$

مثال :

توربين رد فعلى يدور بسرعة ( 200 R P M ) ويلزمه صرف مقداره  
( 0.5 m<sup>3</sup> / s ) تحت علومائي مقداره ( 40 m ) وينتج قدرة فعلية مقدارها  
( 1170 K W ) . احسب الكفاءة الكلية للتوربين .

$$W P = \frac{P g Q H}{1000} = \frac{1000 * 9.81 * 5 * 40}{1000} = 1962 \text{ K W}$$

$$\eta_t = \frac{B P}{W P} = \frac{1170}{1962} = 0.596$$

• • •

الفصل الخامس  
إنتاج الطاقة الكهربائية





## مقدمة الفصل الخامس

المولد الكهربائي عبارة عن جهاز يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. وتستعمل المولدات الكهربائية في الصناعة لإنتاج التيار المستمر ( D C ) أو التيار المتردد ( A C ). ففي السيارة مثلاً فإن وظيفة المولد ( الدينامو ) توليد الطاقة الكهربائية التي تُخزن في المرمك لحين الاستعمال حيث يعمل المرمك في هذه الحالة كمكثف للطاقة الكهربائية .

وفي التطبيقات العملية الكبرى فإن المولدات الكهربائية تُقاد بواسطة توربينات غازية أو بخارية، حيث تصل كفاءة التحويل في بعض هذه المولدات الكبيرة إلى أكثر من ٩٠ ٪ في حين أن هذه الكفاءة قد تنخفض إلى ٥٠ ٪ في المولدات الصغيرة .

## مبدأ عمل المولد الكهربائي ( المنوبة )

يعتمد مبدأ عمل مولد التيار الكهربائي المتردد ( A C generator or alternator ) على قانون فاراداي ( Faraday's law ) ، الذي ينص على أن فرقاً في الجهد يتولد في موصل كهربائي يتحرك بشكل متعامد على خطوط مجال مغناطيسي . والصيغة الرياضية لهذا القانون :

$$V = n \frac{d\phi}{dt} \quad ( ١ - ٥ )$$

حيث :

$V$  : فرق الجهد المتولد في الملف .

$n$  : عدد لفات الملف .

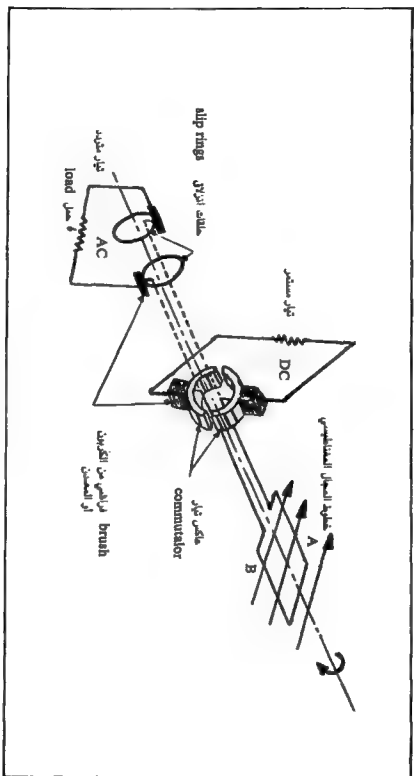
$\frac{d\phi}{dt}$  : معدل التغير الزمني للتدفق المغناطيسي

( Magnatic flux ) أو خطوط القوى المغناطيسية

التي يتحرك فيها الملف .

أما قطبية الجهد المتولد فإنها تحدد بواسطة قانون لنز ( Lenz's law ) ، الذي ينص على أن فرق الجهد المتولد يكون بحيث أن التيار المتولد عن هذا الجهد يُنتج تأثيراً مغناطيسياً معاكساً للتغير في المجال المغناطيسي الذي يولد فرق الجهد في الملف ( قانون الفعل ورد الفعل ) .

كما هو مبين في الشكل ( ١ - ٥ ) فإن المولد الأساسي يتكون من ملف

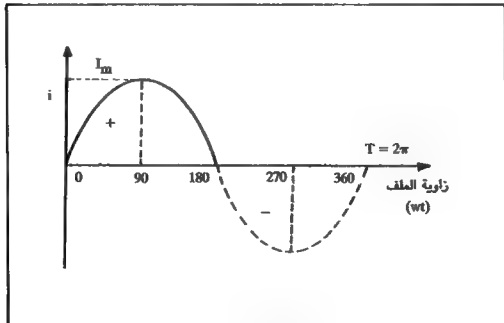


الشكل ( ٥ - ١ )  
المولد الكوريكتيكي الاستثنائي

ذي لفة واحدة لموصل كهربائي يدور في مجال مغناطيسي معامد لاتجاه الموصل ( السلكان A و B ) ولتحصول على تيار متردد ( A C ) فإن طرفي الموصلين ( A ) و ( B ) يوصلان بطقتي انزلاق ( Slip rings ) مثبتتين على عمود الملف ( Coil shaft ) ومعتزلتين بعضهما عن بعض وعن العمود ، وفي هذا الوضع فإن التيار المتولد يبقى على حاله من دون تغيير، أي على شكل تيار متردد ، يؤخذ من حلقات الانزلاق إلى الحمل الخارجي بواسطة قرشتين من المعدن أو الكربون تنزلقان على حلقتي انزلاق كما هو مبين في الجزء المنقط من الشكل ( ١ - ٥ ) .

تولد الدورة الكاملة للملف ( ٣٦٠ ° ) تياراً متردداً يتخذ شكل المنحنى الجيبي ( Sine Wave ) كما هو مبين في الشكل ( ٢ - ٥ ) ونصف هذه الدورة موجب والنصف الآخر سالب ( في اتجاه معاكس ) .

تعطى قيمة تيار الهيئة الموجبة ( تيار المنحنى الجيبي ) المبين في الشكل ( ٢ - ٥ ) بالمعادلة :



الشكل ( ٢ - ٥ )  
تيار المنحنى الجيبي

$$i = I_m \sin \omega t \quad (2-5)$$

حيث :

$i$  : القيمة اللحظية للتيار ( أمبير ) .

$I_m$  : القيمة العظمى للتيار أو اتساع ( Amplitude ) الموجة  
( أمبير ) .

$\omega t$  : زاوية الملف مقاسة بالدرجات الكهربائية  
( Electrical degrees ) .

$t$  : الزمن ( ثانية ) .

ويعرف التردد ( $f$ ) للموجة بأنه عدد الدورات التي تحدث في وحدة الزمن .  
ووحدة التردد هي دورة / ثانية أو الهيرتز ( $H_z$ ) حيث ان :  
(  $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$  ) ومن مضاعفات هذه الوحدة الكيلوهرتز (  $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$  )  
(  $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$  ) والميغاهيرتز (  $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$  ) وتعرف الفترة ( Period )  $T$   
بأنها الزمن — بالثانية — الذي تستغرقه الدورة الواحدة .

$$T = \frac{1}{f} \quad (2-6)$$

وباستخدام المعادلة (2-6) فإنه يمكن إعادة كتابة المعادلة (2-5)  
على النحو :

$$i = I_m \sin \left( \frac{2\pi}{T} t \right) \quad (2-7)$$

أو :

$$i = I_m \sin (2\pi f t) \quad (2-8)$$

حيث أن :

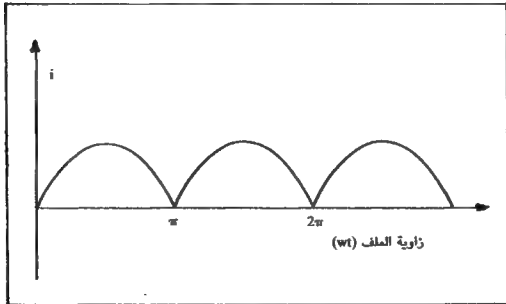
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2-9)$$

إذا كان الغرض توليد تيار مستمر ( D C ) فإن ذلك يتم باستبدال حلقات الانزلاق بعكس التيار ( Commutator ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ١ )  
— الخط المتصل — .

وعاكس التيار عبارة عن حلقتي معدن تقسم كل منهما إلى أجزاء مفردة معزولة بعضها عن بعض وعن العمود المربوطة إليه ( عمود الملف ) .

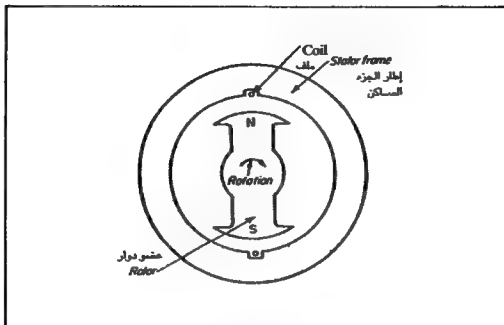
في حالة مولد التيار المستمر البسيط ( ذي الملف الواحد ) فإن عاكس التيار يمكن اعتباره قطعتين فقط تتزاق على كل منهما فرشاة من الكربون وتتصل قطعتي الكربون بسلكتين لإكمال الدائرة الكهربائية مع الحمل الخارجي ويكون شكل التيار المتولد من هذا المولد البسيط كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ٢ ) .

كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ٤ ) ، يتكون مولد التيار المتردد أو المنويّة ( Alternator ) من جزئين أساسيين هما الجزء الدوار ويسمى بالعضو الدوار ( Rotor ) والجزء الساكن ( Stator ) وفي المنويّات الحديثة فإن ملفات المجال ( Field windings ) تُربط على العضو الدوار بينما يكون المنتج ( Armature ) ثابتاً ، ولهذا فإن الفولتية العالية المتولدة تكون في المنتج ، وتزود من المنتج



الشكل ( ٥ - ٣ )

التيار المتولد في حالة استخدام عاكس تيار مكون من قطعتين فقط



الشكل ( ٤ - ٥ )  
المكونات الأساسية لمولد التيار المتردد ( المنويّة )

للأحمال الخارجية في حين تستعمل حلقات الانزلاق والفراشي لتزويد التيار المنخفض — مقارنة مع التيار المتردد — المستمر ( D C ) إلى ملفّات العضو الدوار ( ملفّات المجال المغناطيسي الدوار ) ولهذا فإنّ المنويّة ( Alternator ) بحاجة إلى مولد تيار مستمر ( D C ) للقيام بذلك ( توفير التيار المستمر ) .

وحسب الطور الناتج يمكن تصنيف المنويّات إلى :

#### ١ — لحادية الطور : ( Single phase )

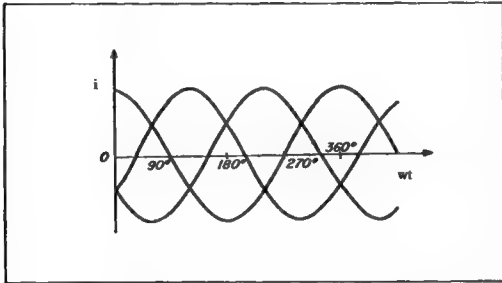
وفي هذه الحالة فإنّ ملفّات المنتج تكون متصلة بعضها مع بعض لجمع الفولتية المترددة في كل ملف بشكل منفرد ويكون هناك سلكان نهائيان فقط للمولد لإعطاء الفولتية الناتجة .

#### ٢ — ثنائية الطور : ( Two phase )

يضم المنتج مجموعتين من الملفّات مرتبة بحيث إن الفولتية أو التيار المتردد في كل سلك من الأسلاك الخارجة من المولد — أحدهما مشترك Common — يفصل بينهما زاوية طور ( Phase angle ) مقدارها ٩٠° .

### ٣ - ثلاثية الطور : ( Three phase )

يضم المنتج ثلاث مجموعات من الملفات مرتبة بحيث ان الفولتيات الخارجة من هذه الملفات يفصل بينها زاوية طور مقدارها  $120^\circ$  كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ٥ ) ، وفي هذا الترتيب هناك ست أسلاك ( ثلاثة أزواج من الأسلاك ) للتيار أو الجهد المتولد ، يمكن توصيلها إما بطريقة واي ( Y connection ) أو بطريقة دلتا (  $\Delta$  connection ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ٦ ) .



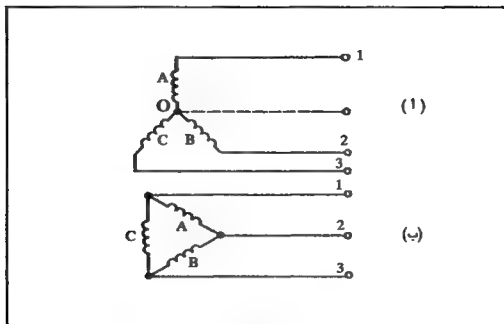
الشكل ( ٥ - ٥ )

التيار أو الجهد المتولد من مولد كهربائي ثلاثي الطور

في توصيلة (  $\Delta$  ) فإن فرق الجهد بين خطين (  $V_{12}$  ) مثلاً ( يسمى الجهد الخلفي ) يساوي فرق الجهد في أي ملف ( C ) و ( B ) و ( A ) أي أن (  $V_{12} = V_A = V_C$  ) في حين أن تيار الخط يساوي تيار الملف مضروباً في (  $\sqrt{3}$  ) أي أن (  $I_1 = I_A \sqrt{3}$  ) مثلاً .

وفي توصيلة ( Y ) فإن فرق الجهد بين خطين (  $V_{12}$  ) — مثلاً — يساوي فرق الجهد للملف مضروباً في (  $\sqrt{3}$  ) أي أن (  $V_{12} = \sqrt{3} V_A$  ) مثلاً ، بينما تيار الخط يساوي تيار الملف وكذلك فإن فرق الجهد للملف يساوي فرق الجهد





الشكل ( ٦ - ٥ )  
التوصيلات ثلاثية الطور.  
( ١ ) توصيلة واي ( Wye ) أو ستار ( Star )  
( ب ) توصيلة دلتا ( Delta )

بين أي خط والخط المتعادل ، أي أن (  $V_B = V_C = V_{10} = V_{20} = V_{30}$  )  
(  $V_A$  )

وفي النظام ثلاثي الطور فإن القدرة الكهربائية الناتجة :

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta = 3 V_b I_b \cos \theta \quad ( ٧ - ٥ )$$

حيث :

.  $I_L, V_L$  : جهد و تيار الخطوط على الترتيب .

.  $I_C, V_C$  : جهد و تيار الفروع ( الملفات ) .

.  $\cos \theta$  : معامل القدرة ( Power factor ) .

أما العلاقة بين السرعة الدورانية للمولد ( N ) والتردد الناتج ( f ) فهي :

$$N = \frac{120 f}{n_p} \quad ( ٨ - ٥ )$$

حيث :

N : السرعة الدورانية للمولد ( R P M ) دورة / دقيقة .

f : تردد التيار المتولد ( Hz ) هيرتز .

$n_p$  : عدد الاقطاب الموجودة على العضو الدوار للمنوبة

. ( Alternator )

### ٣ - ٥

## الطرق المباشرة لتوليد الطاقة الكهربائية

### ٥ - ٣ - ١ التوليد الكيميائي :

إن المراكم ( البطاريات ) وخلايا الوقود ( Fuel cells ) هما نظامان تتحول فيهما الطاقة الكيميائية المخزنة إلى طاقة كهربائية مباشرة دون الحاجة إلى المرور عبر التحول إلى طاقة حرارية ، ولهذا فإن عملية التحويل هذه لا يحدّها القانون الثاني للثيرموديناميكا الحرارية ، أي أنها لا تخضع لقانون أقصى كفاءة للآلة الحرارية للإرجاعية (  $\eta = 1 - T_L / T_H$  ) ، ولهذا السبب فإن هذين النظامين يلاقيان الاهتمام وتكثر البحوث عنهما .

تتشابه المراكم وخلايا الوقود في عملها مع وجود فرق رئيس ، وهو أن المرمك يحتوي على كمية محدودة من الوقود أو الطاقة الكيميائية في حين أن خلية الوقود تعمل تحت تزويد مستمر للوقود . بعض المراكم هي أجهزة انعكاسية ، أي أن نواتج التفاعل الكيميائي يمكن إعادة شحنها ( فصلها ) إلى مكوناتها الأصلية بواسطة تزويد البطارية بالكهرباء في عملية إعادة الشحن ( Recharging ) ، ولكن خلايا الوقود لا يمكن إعادة شحنها لأن نواتج التفاعل الكيميائي يتم التخلص منها باستمرار ، وتستخدم المراكم كأنظمة خزن للطاقة ويمكن تقسيمها إلى قسمين رئيسيين :

١ — المراكم الأولية ( Primary batteries ) .

٢ — المراكم الثانوية ( Secondary batteries ) .

والمراكم الأولية لا يمكن عادةً إعادة شحنها ولكن المراكم الثانوية — مثل المرمك الرصاصي في السيارات — فإنه بالإمكان إعادة شحنها .

تتشابه خلية الوقود مع المرمك في التركيب من حيث ان لكل منهما قطبان ( Electrodes ) بينهما سائل أيوني ( Electrolyte solution ) والذي هو عبارة عن محلول يتحال كهربائياً في خلايا الوقود . يتم تغذية المتفاعلات من الوقود — الهيدروجين أو أول أكسيد الكربون غالباً — لأحد الأقطاب المسامية ( Porous ) — electrode بينما يتم تغذية الأكسجين أو الهواء للقطب المسامي الآخر .

وتقوم الأقطاب في خلايا الوقود بثلاث مهمات :

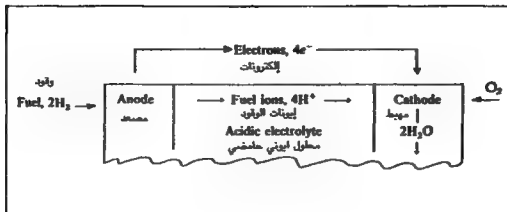
١ — يجب أن يكون القطب مسامياً بحيث ان الوقود والسائل الأيوني تكون قادرة على اختراقه لتحقيق أفضل اتصال بينهما . تعد أحجام المسامات ( Pore size ) للأقطاب ذات أهمية بالغة في خلايا الوقود، فإذا كانت هذه الأحجام كبيرة ، فإن الوقود الغازي يكون فقاعات في هذه المسامات مما يؤدي إلى هدر الوقود، وإذا كانت هذه المسامات صغيرة الحجم كثيراً ، فإنه لا يتم تحقيق اتصال كافٍ بين المتفاعلات والسائل الأيوني مما يؤدي إلى خفض سعة المرمك .

٢ — يجب ان يحتوي القطب على عوامل مساعدة كيميائية ( Chemical catalysts ) تقوم بتكسير مركبات الوقود إلى ذرات ليكون الوقود أكثر فعالية . وأكثر أنواع العوامل المساعدة استعمالاً هي البلاتين ( Platinum ) والنيكل .

٣ — يجب ان تكون الأقطاب قادرة على إيصال الإلكترونات إلى النهايات ( Terminals ) كما يجب ان يكون السائل الأيوني ذا نفاذية عالية ( Highly permeable ) لكل من أيونات (  $H^+$  ) أو (  $OH^-$  ) والتي تتولد كتولتج وسطية على إحدى الأقطاب .

وينتقل الايون (  $H^+$  أو  $OH^-$  ) إلى القطب الآخر عبر السائل الأيوني ليتحد مع المتفاعل الآخر بينما تنتقل الإلكترونات خلال أسلاك الدائرة الخارجية إلى القطب الآخر حيث يتكون ناتج التأكسد .

إذا كانت خلية الوقود تحرق الأكسجين والهيدروجين وتحتوي على محلول أيوني حامضي — الشكل ( ٥ - ٧ ) — فإن الأيون الوسطي الناتج هو (  $H^+$  ) وتكون تفاعلات الخلية العامة :



الشكل ( ٧ - ٥ )  
تفاعلات خلية وقود ذات محلول ايوني حامضي

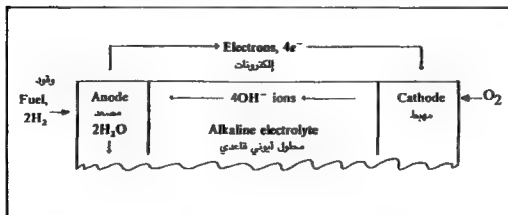
تفاعل المصعد :



تفاعل المهبط :

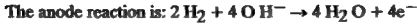


وإذا كانت خلية الوقود (أكسجين - هيدروجين) تستخدم محلول ايوني قاعدي (Alkaline electrolyte) كهيدروكسيد البوتاسيوم - الشكل ( ٨ - ٥ ) - فإن الايون الوسطي هو ( $OH^-$ ) وتكون تفاعلات الخلية العامة :



الشكل ( ٨ - ٥ )  
تفاعلات خلية وقود ذات محلول ايوني قاعدي

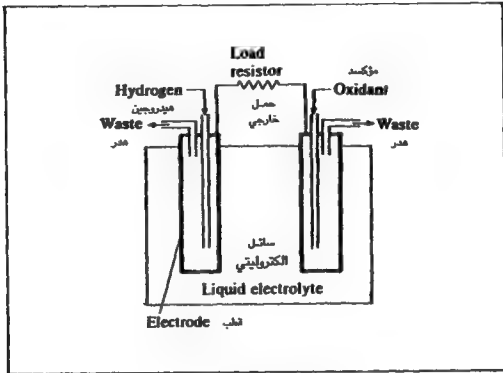
تفاعل المصعد :



تفاعل المهبط :



الشكل ( ٩ - ٥ ) يبين رسماً تخطيطياً لخلية وقود نموذجية .



الشكل ( ٩ - ٥ )

رسم تخطيطي لخلية وقود نموذجية

— أنواع خلايا الوقود :

معظم خلايا الوقود العاملة هي خلايا ذات درجة حرارة منخفضة تستخدم الهيدروجين والأكسجين كمتفاعلات وتقل درجة حرارتها العاملة عن ٥٠٠ كلفن . إن تخفيض درجة الحرارة العاملة يحسن الكفاءة التحويلية بينما يزداد

معدل التأكسد أو القدرة الناتجة للخلية بزيادة ضغط أو درجة حرارة النظام أو كليهما . إن خلية الوقود الناجحة يجب أن تحقق شرطين أساسيين ، هما :

#### ١ - الثبات : ( Invariance )

ويتضمن هذه الصفات قدرة النظام على الاستمرار بالعمل لفترة طويلة بموثوقية وبدون حدوث تلف للعوامل المساعدة نتيجة لوجود الشوائب في المتفاعلات أو انسداد ( Logging ) لمسامات الأقطاب أو تكون للفقااعات أو تداخل واختلاط للمفاعلات ( Inter diffusion ) .

#### ٢ - التفاعلية : ( Reactivity )




ويتقضي هذه الصفة الحصول على أقصى طاقة ممكنة من التفاعلات الكيميائية عند معدلات تفاعل مرتفعة نسبياً ، ولهذا فإنه من المهم أن تتأكسد جميع ذرات الوقود بشكل كامل خلال عمل الخلية ، ويمكن زيادة معدل التفاعل باستعمال أقطاب مسامية كبيرة حتى يكون سطح التفاعل بين الغاز والمحول الأيوني أكبر ما يمكن ، كما يمكن زيادة معدل التفاعل بزيادة الضغط العامل أو درجة الحرارة العاملة أو كليهما ، وأسوء الحظ فإن الخطوات المتخذة لزيادة معدل التفاعل تتعارض مع متطلبات الثبات للخلية .

#### ٥ - ٣ - ٢ التوليد الكهروضوئي :

يمكن تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية — مباشرة — إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلية الكهروضوئية ( Photovoltaic-cell ) والتي تسمى عادة بالخلية الشمسية ( Solar cell ) . وكما هو الحال بالنسبة لخلية الوقود فإن الكفاءة التحولية لهذا النظام غير محدودة بكفاءة المحرك الحراري الإرجاعي القصوى التي يحكمها القانون الثاني . وعلى الرغم من ذلك ، فإن كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية محدودة بقيمة منخفضة نسبياً .

ينصب الاهتمام الأساسي على إمكانية تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية — من الشمس مباشرة — إلى كهرباء ، فعمل الخلية الكهروضوئية ( الخلية الشمسية ) يعتمد على استغلال الوصلة الثنائية P-n ( P-n Junction ) التي تتكون من مادتين شبه موصلتين ( Semi-Conductors ) .

إن أكثر مادتين شبه موصلتين أهمية في علم الإلكترونيات هما السيلكون ( Si ) والجرمانيوم ( Ge ) . يقع هذان العنصران في العمود الرابع من

III 	IV 	V 
5 B BORON 10.82	6 C CARBON 12.01	7 N NITROGEN 14.008
13 Al ALUMINUM 26.97	14 Si SILICON 28.09	15 P PHOSPHORUS 31.02
31 Ga GALLIUM 69.72	32 Ge GERMANIUM 72.60	33 As ARSENIC 74.91
49 In INDIUM 114.8	50 Sn TIN 118.7	51 Sb ANTIMONY 121.8

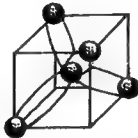
الجدول ( ٥ - ١ )  
العناصر شبه الموصلة في الجدول الدوري

الجدول الدوري، ولكل منهما أربع إلكترونات تكافؤ ( إلكترونات حرة في مداره الأخير ) كما هو مبين في الجدول ( ٥ - ١ ) ، الذي يوضح جزءاً من الجدول الدوري الذي يظهر فيه هذان العنصران .

يتخذ التركيب البلوري لكل من عنصري السيليكون والجرمانيوم شكلاً رباعي السطوح ( Tetrahedral ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ١٠ ) حيث ترتبط كل ذرة من ذرات البلورة بأربعة ذرات مجاورة لها، كما هو مبين في الشكل ( ٥ - ١١ ) . تلزم طاقة مقدارها حوالي ( 1.1 e V ) للسيليكون وطاقة مقدارها حوالي ( 0.7 e V ) للجرمانيوم لكسر الرابطة التساهمية أو المشتركة في كل منهما .

وعند كسر إحدى الروابط التساهمية في البلورة يتحرر أحد الإلكترونات





الشكل ( ٥ - ١٠ )  
الشكل رباعي السطوح لبلورة السيليكون

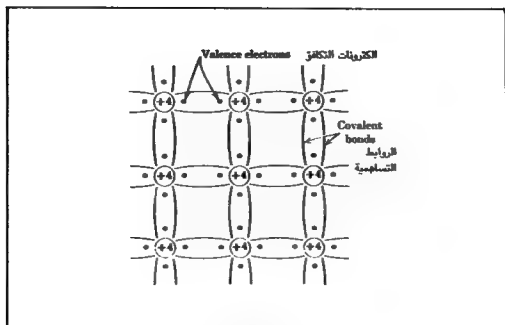
( يصبح حر الحركة في البلورة ) ويترك وراءه فجوة ( Hole ) ذات شحنة موجبة .

ويساهم كل من الإلكترونات الحرة والفجوات في عملية التوصيل الكهربائي بشكل مستقل ، حيث انه يمكن الافتراض بأن الفجوات — موجبة الشحنة — تتحرك باتجاه معاكس لحركة الإلكترونات الحرة في البلورة . الشكل ( ٥ - ١٢ ) يبين بلورة سيليكون بإلكترون حر وفجوة نتيجة لكسر إحدى الروابط التساهمية .

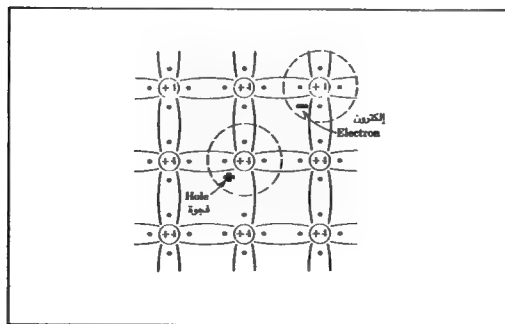
في المادة شبه الموصلة النقية يكون عدد الإلكترونات الحرة مساوياً لعدد الفجوات، وعلى درجات الحرارة العادية فإن جزءاً بسيطاً من إلكترونات التكافؤ تكون جاهزة للتوصيل ( الإلكترونات الحرة ) .

يمكن زيادة تركيز حاملات الحرة ( Free carriers ) في المادة شبه الموصلة وبالتالي زيادة موصليتها وذلك بزيادة درجة حرارتها ، ويمكن زيادة هذه الموصلية بشكل أكبر ( والتحكم بهذه الزيادة ) بإضافة كميات قليلة من الشوائب ( Impurities ) لهذه المادة في عملية تسمى بعملية التطعيم ( Doping ) .

فعد إضافة كميات قليلة من عنصر له خمس إلكترونات تكافؤ كالفسفور ( P ) إلى عنصر السيليكون النقي فإن ذرات الفسفور ( المادة الشائبة ) تحل محل بعض ذرات عنصر السيليكون في البلورة وتشارك ذرة المادة الشائبة ذرات السيليكون المجاورة لها بأربعة روابط بينما يبقى الإلكترون الخامس من إلكترونات التكافؤ حراً ، وتسمى المادة الناتجة من عملية التطعيم هذه بالمادة شبه الموصلة



الشكل ( ١١ - ٥ )  
تمثيل ثنائي - البعد لذرات السيلكون في البلورة



الشكل ( ١٢ - ٥ )  
بلورة سيلكون بمرابطة تساهمية غير مكتملة ( مكسورة )

الروابية ( Danor ) أو المادة شبه الموصلة من نوع n- ( n-Type ) كما هو مبين في الشكل ( ١٣ - ٥ ) .

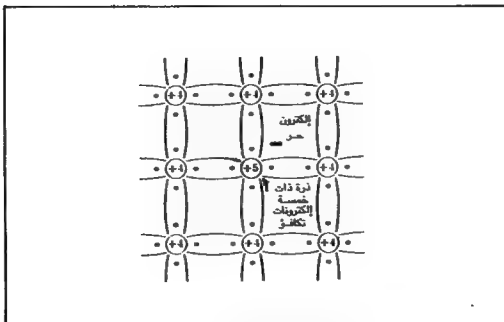
وفي حالة إضافة مادة شائبة ذات ثلاثة إلكترونات تكلف كالألومنيوم ( Al ) إلى بلورة السيلكون فإن المادة الناتجة من عملية التطعيم هذه تسمى بالمادة شبه الموصلة القابلة ( Acceptor ) أو المادة شبه الموصلة نوع P- ( P-Type ) كما هو مبين في الشكل ( ١٤ - ٥ ) .

وكما هو واضح في الشكل فإن المادة الشائبة تشارك بثلاث روابط مع ثلاث ذرات من السيلكون المجاورة لها بينما تبقى الرابطة الرابعة غير مكتملة مما يؤدي إلى إيجاد فجوة ( شحنة موجبة ) في البلورة .

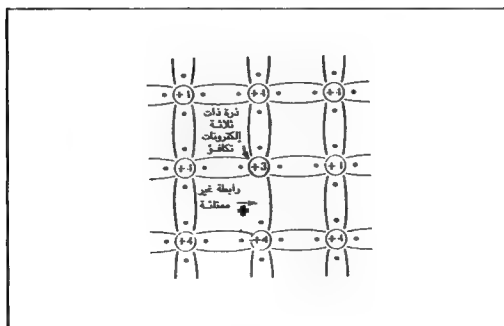
عند إصاق مادة من نوع n- ( ذات شحنة سالبة ) بأخرى من نوع P- ( ذات شحنة موجبة ) تنتقل الإلكترونات عبر السطح الفاصل ( سطح الالتصاق ) من المادة n- إلى المادة P- لملء الفجوات الموجبة فيها . ونتيجة لهذا الانتقال يرتفع الجهد للمادة من نوع n- وينخفض الجهد للمادة من نوع P- حتى يصل الفرق في الجهد بين المادتين حداً معيناً تتوقف عنده عملية انتقال الإلكترونات عبر السطح الفاصل ، وتسمى الوصلة المؤلفة من مادتين ملتصقتين إحداهما من نوع n- والأخرى من نوع P- بالوصلة الثنائية P-n ( P-n Junction ) . الشكل ( ١٥ - ٥ ) يبين رسماً تخطيطياً لوصلة ( P-n ) الثنائية ويظهر الشكل آلية توصيل الشحنات عبر السطح الفاصل بين المادتين شبه الموصلتين .

تتكون الخلية الشمسية عادة من وصلة ( P-n ) ثنائية كما هو مبين في الشكل ( ١٦ - ٥ ) .

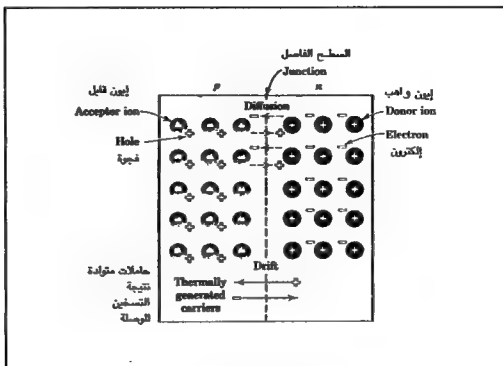
عندما تسقط الفوتونات الضوئية من أشعة الشمس على الخلية الشمسية فإنها تتفاعل مع الإلكترونات الحرة ( الإلكترونات التكافؤ ) للوصلة الثنائية ( P-n ) وتكسبها الطاقة اللازمة لإثارتها أو تنشيطها ( Excitation energy ) وينتج عن هذا التفاعل بين الإلكترونات والفوتونات — التي تمتلك الطاقة اللازمة للإثارة — تجمع للشحنات الموجبة ( الذرات التي فقدت إلكتروناتها ) في شبه الموصل نوع n- . وإذا وصلت المادتان ( n ) و ( P ) بدائرة خارجية فإن الإلكترونات تسري في هذه الدائرة من مادة n- إلى مادة P- لتُعادِل الشحنات الموجبة فيها ، أي أنه يتولد تيار كهربائي في الدائرة الخارجية يسري من مادة P- إلى مادة n- ، وهكذا تقوم هذه الخلية الشمسية بتحويل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية .



الشكل ( ١٣ - ٥ )  
تأثير التطعيم بمادة من عناصر المجموعة الخامسة



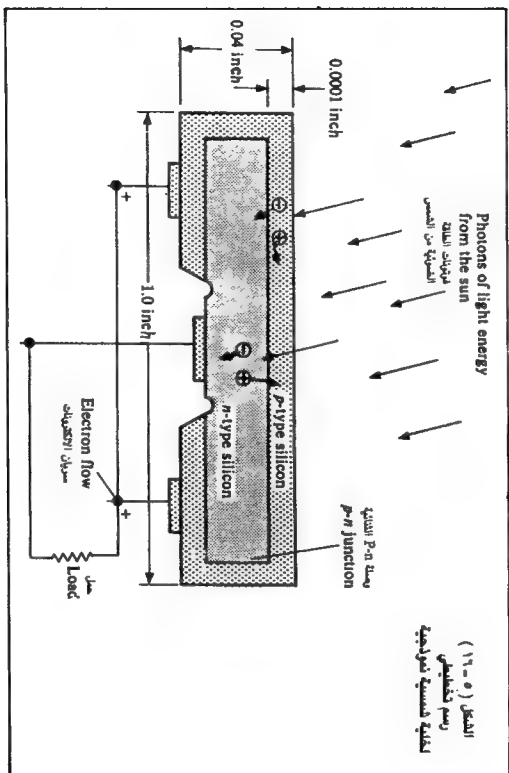
الشكل ( ١٤ - ٥ )  
تأثير التطعيم بمادة من عناصر المجموعة الثالثة



الشكل ( ٥ - ١٥ )  
رسم تخطيطي لوصلة P-n الثنائية

هناك نوعان من الفواقد الرئيسية هما فقد الوصلة ( Junction Loss )  
والفقد الطيفي ( Spectrum Loss ) . ويعود فقد الوصلة إلى تدفق الحاملات  
الفرعية ( Minority carriers ) في الوصلة . وعلى الرغم من أن معدل تدفق هذه  
الحاملات أقل بكثير من معدل تدفق الحاملات الرئيسية ( Majority carriers )  
إلا أنه لا يمكن إهماله حيث أن هذا الفقد يخفض كفاءة الخلية الشمسية بصوالى  
٥٠ ٪ .

أما الفقد الطيفي فيكون مصاحباً لطيف الطاقة للفوتونات الساقطة والطاقة  
المنشطة لمادة شبه الموصل حيث أن بعض هذه الفوتونات يمتلك طاقة أكبر من  
تلك اللازمة للإثارة أو التنشيط ( ١,١ إلكترون - فولت لخلية السيليكون ) فتتحول  
الطاقة الزائدة إلى طاقة حرارية وبعضها يمتلك طاقة أقل من تلك اللازمة للإثارة  
فتتحول طاقتها إلى طاقة حرارية لا تساهم في توليد الطاقة الكهربائية في الخلية .



الشكل ( ١٦ - ٥ )  
رسم تخطيطي  
لخلاية شمسية لتوليدية

وهناك عدد من الفوائد الثانوية تصاحب عمل الخلية الشمسية وتشمل انعكاس الفوتونات عن الخلية وعودة الايونات للاتحاد مع بعضها ( Recombination ) قبل وصولها للحد الفاصل بين المادتين (n) و ( P ) والفقد الناتج عن عملية تسخين جول ، خصوصاً في الطبقات الخارجية للمادة شبه الموصلة . وبأخذ جميع الفوائد بعين الاعتبار ، فإن أقصى كفاءة ممكنة للخلية هي ٢٥ ٪ بينما تتراوح الكفاءة العملية المعروفة للخلايا الشمسية المستخدمة ما بين ١٥ — ٢٠ ٪ .

والخلايا الشمسية عدد من الفوائد — مقارنة مع أنظمة التحويل الشمسية الأخرى — فهي بسيطة وصغيرة الحجم ولها نسبة ( قدرة / وزن ) عالية مما يجعل استخدام هذه الخلايا مفر في التطبيقات الفضائية . كذلك فإن الخلايا الشمسية ليس بها أجزاء متحركة وأنها كفاءة تحويلية عالية — من طاقة شمسية إلى طاقة كهربائية — .

نظرياً ، فإن عمر الخلية الشمسية غير محدود ، وعملياً فإنها تعاني مع الزمن من تلف شعاعي ناتج عن جسيمات عالية الشحنة قادمة من الفضاء مثل الإلكترونات الناتجة عن حزام فان آلن الإشعاعي حول الأرض ( Van Allen radiation belt ) .

أهم مشاكل الخلايا الشمسية هو تكاليف إنتاجها الباهظة وتصنيعها ، كذلك الحاجة إلى وجود نظام تخزين لهذه الخلايا وذلك لتوفير الطاقة الكهربائية في الليل وفي الأيام الغائمة .

### ٥ - ٣ - ٢ التوليد باستخدام طاقة الرياح :

إن أهم ما يميز الرياح كمصدر لتوليد الطاقة الكهربائية هو أن الطاقة الموجودة في الرياح تتناسب مع مكعب سرعة هذه الرياح . فالقدرة التي تمتلكها كتلة من الرياح مقدارها ( m ) وتحرك بسرعة مقدارها ( V ) وكثافتها مقدارها ( P ) وتمر خلال مروحة هوائية ذات محور دوران أفقي ( Horizontal axis wind turbine ) مساحتها (المساحة الدائرية التي تشملها شفرات المروحة خلال دوراتها ) مقدارها ( A ) هي :

$$Power = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad ( ٥ - ٩ )$$

وقد اظهرت الحسابات التي قام بها الباحث بتز ( Betz ) عام ١٩١٩ ان اقصى نسبة من الطاقة الحركية التي يمكن استخلاصها من الرياح تساوي ١٦ / ٢٧ ( ٠.٥٩٢ ) من القدرة الموجودة ، وهكذا فإن القدرة العظمى للتوربين الهوائي :

$$\text{Theoretical maximum power out put} = 0.297 P A V^3 \quad (١٠ - ٥)$$

ولكن الفوائد التي تصاحب عمليات تحويل الطاقة تؤدي إلى تخفيض هذه القيمة بنسب متفاوتة حسب نوع التوربين الهوائي ، وتبلغ نسبة التخفيض عادة حوالي ثلثي النسبة النظرية العظمى .

أي أن :

$$\text{Available power out put} = \left(\frac{2}{3}\right) 0.297 P A V^3 \approx \quad (١١ - ٥)$$

$$V^3 0.2 P A$$

وإذا افترضنا أن قطر المروحة الهوائية هو ( D ) ، فإن المعادلة (١١ - ٥) تصبح :

$$\text{Available power out put} = 0.05 \pi P D^2 V^3 \quad (١٢ - ٥)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن قدرة الرياح المتوافرة عند سرعة معينة تتناسب مع مربع قطر المروحة الهوائية

ومن المتغيرات الشائع استعمالها في حسابات طاقة الرياح :

معامل القدرة ( Power coefficient  $C_p$  )

$$C_p = \frac{\text{Power out put of wind turbine}}{\frac{1}{2} P A V^3} \quad (١٣ - ٥)$$

ومعامل القدرة الكلي ( Overall power coefficient  $C_{po}$  )

$$C_{po} = \frac{\text{Power out put at generator}}{\frac{1}{2} P A V^3} \quad (١٤ - ٥)$$

ومن المعادلة الأخيرة نجد أن معامل القدرة الكلي يشمل الفوائد الناتجة عن



عمليات نقل القدرة — بواسطة التروس — وكفاءة التحويل للمواد الكهربائية .

ولتوليد تيار كهربائي متردد ( A C ) ، فإن التوربين الهوائي يجب تصميمه للعمل بسرعة دورانية ثابتة وذلك للحصول على تردد ثابت للتيار .

وهناك عدة أنواع من التوربينات الهوائية، وتشمل هذه الأنواع التوربينات ذات السريان المحوري ( Axial flow turbines ) والتوربينات ذات السريان القطري ( Radial turbines ) المربوطة على محور عمودي . الشكل ( ٥ - ١٧ ) يبين نوعين من مراوح ( الأعضاء الدوارة ) التوربينات الهوائية .

يجب تصميم التوربينات الهوائية بحيث تكون نسبة ( القدرة / الوزن ) أكبر ما يمكن لتقليل الاجهادات المتولدة في شفرات المروحة الهوائية الناتجة عن قوة الطرد المركزي .

يواجه نظام توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح بعض المشاكل التي لا يمكن تجنبها ، فإذا كان الغرض هو توليد تيار كهربائي متردد ( A C ) فإن ذلك يتطلب توافر سرعة دورانية ثابتة وقوة ثابتة لمروحة التوربين ، وإسوء الحظ فإن سرعة الرياح ليست ثابتة لا في المقدار ولا في الاتجاه، كذلك فإنها تتغير من قاع إلى قمة المروحة في حالة كون المروحة الهوائية ذات قطر كبير نسبياً مما يؤدي إلى عدم ثبات سرعة المولد، كذلك فإنه يخلق إجهادات داخلية متغيرة في شفرات المروحة تؤدي إلى إضعافها وإجهادها مع الزمن .

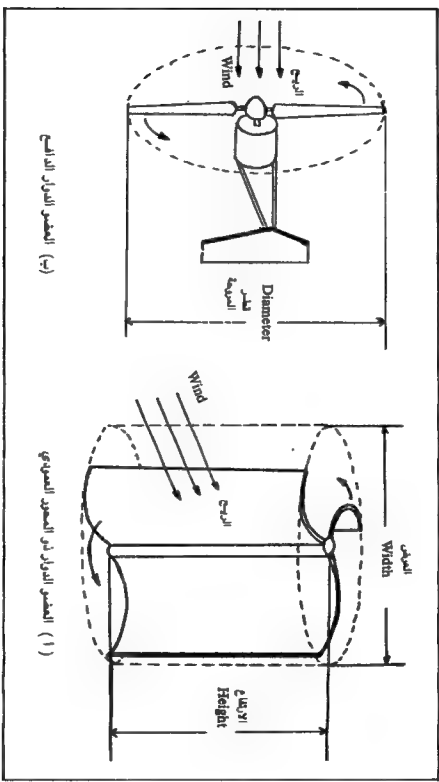
وأحياناً تضعف سرعة الرياح لدرجة أنها لا تكفي لتوليد الطاقة الكهربائية مما يقتضي وجود نظام تخزين للطاقة .

وعلى الرغم من جميع هذه المشاكل فإن توليد الطاقة من الرياح — خصوصاً الطاقة الكهربائية — يلاقي اهتماماً وتستمر البحوث بصدد ذلك لكون طاقة الرياح طاقة نظيفة وغير ملوثة للبيئة . الشكل ( ٥ - ١٨ ) يبين رسماً تخطيطياً لنظام توليد للطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح .

ويمكن تصنيف التوربينات الهوائية حسب معدلات القدرة المنتجة إلى ثلاثة أقسام :

١ — صغيرة — من صفر — ٩ كيلواط — .

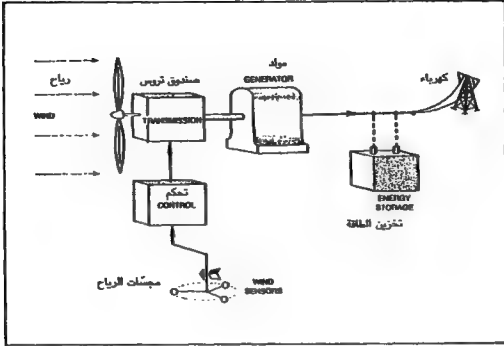
٢ — متوسطة — من ١٠ — ٩٩ كيلواط — .



(ب) المحور الدوار الدائري

(ا) المحور الدوار ذو المحاور المتعددة

الشكل (١٧-٥)  
بعض أنواع المراوح الهوائية



الشكل ( ١٨ - ٥ )  
رسم تخطيطي لنظام توليد كهربائي باستخدام طاقة الرياح

٢ - كبيرة - من ١٠٠ - ٣٠٠٠ كيلوواط - .

وحسب التركيب تصنف إلى :

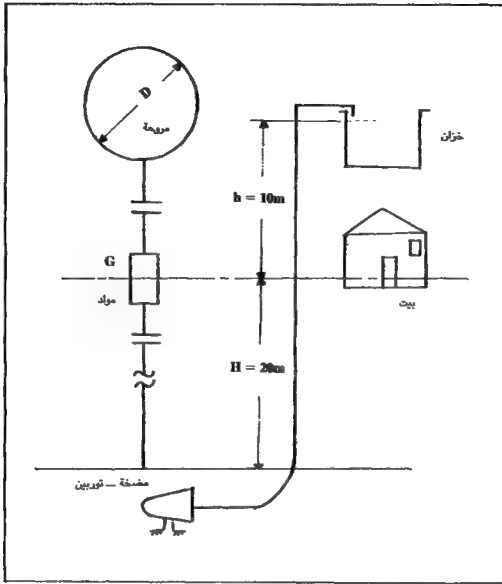
١ - توربينات المحور الأفقي ( Horizontal axis ) .

٢ - توربينات المحور العمودي ( Vertical axis ) .

مثال :

طاحونة هوائية تستخدم لضخ المياه من عمق ٢٠ متراً باستعمال مضخة طاردة مركزية .

يخزن الماء المضخ في خزان يرتفع عشرة أمتار عن سطح الأرض وذلك لاستعماله عند توقف الرياح . ويمكن أن تعمل المضخة كتوربين - إذا عكس اتجاه التدفق للمياه - يتصل بمولد كهربائي يزود بيتاً بطاقة كهربائية مقدارها ١٢٠ كيلوواط - ساعة في اليوم . كفاءة نظام الضخ ( المضخة /



التوربين والانابيب ( ٥٠ ٪ وكفاءة النظام الكهربائي ( المولد والاسلاك ... )  
٨٠ ٪ .

( ١ ) احسب ابعاد خزان الماء بحيث يكون حجمه كافٍ لتشغيل المولد الكهربائي لمدة ثلاثة أيام من دون وجود رياح. افترض أن قطر الخزان مساوٍ لارتفاعه .

(ب) بفترض أن قطر المروحة الهوائية ( D ) وأن معامل القدرة أكبر ما يمكن وأن سرعة الرياح تساوي ١٦ كم / ساعة. احسب قطر المروحة ، بحيث أن هذه المروحة تكون قادرة على تزويد البيت بالكهرباء وتعبئة خزان الماء ( معاً ) في يوم واحد .

$$\frac{120 \text{ Kw} - \text{h}}{\text{day}} \times 3 \text{ days} = 360 \text{ Kw} - \text{hr} \quad (1)$$

$$= 1.296 \times 10^9 \text{ J}$$

$$\text{Energy} = m g H_f \text{ but } m = \rho (\text{Vol})$$

$$\text{Energy} = \rho (\text{Vol}) g (H + h) \eta_m \eta_e$$

$$\text{Vol} = \text{الحجم}$$

$$\eta_m = \text{كفاءة نظام الضخ}$$

$$\eta_e = \text{كفاءة النظام الكهربائي}$$

$$1.296 \times 10^9 = 1000 \times 9.81 \times 30 \times 0.5 \times 0.8 \times \text{Vol}$$

$$\text{Vol} = 11020.4 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol} = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) D$$

$$11020.4 = \frac{\pi D^2}{4} D$$

$$D = 24.1 \text{ m}$$

$$C_p = 16 / 27 \text{ أقصى معامل قدرة (ب)}$$

Theoretical maximum power out put

$$= \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho V^3 A \right)$$

$$= \text{Water power} + \text{Electrical power}$$

Theoretical maximum power output

$$= \frac{P_g Q (H + h)}{\eta_m} = \frac{120 \text{ Kw} - \text{hr} \times 1000}{24 \text{ hr} \times \eta_e}$$

$$Q = \frac{\text{Vol}}{t} = \frac{11020.4 \text{ m}^3}{3 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 0.0425 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$V = 16 \text{ Km} / \text{hr} = 4.44 \text{ m} / \text{s} \quad \text{سرعة الرياح}$$

$$\rho = 1.126 \text{ kg} / \text{m}^3 \quad \text{كثافة الرياح}$$

$$\frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \times 1.126 \times (4.44)^3 \pi D^3 \right)$$

$$= \frac{1000 \times 9.8 \times 0.0425 \times 30}{0.5} + \frac{120 \times 1000}{24 \times 0.8}$$

$$D^2 = 1362.1 \text{ m}^2$$

$$D = 36.91 \text{ m}$$

• • •

**الفصل السادس**  
**تخزين الطاقة Energy Storage**





## مقدمة الفصل السادس

يمكن تخزين الأشكال الرئيسية الستة للطاقة — بشكل ما — باستثناء الطاقة الكهرومغناطيسية التي لا يمكن تخزينها بأي شكل ، فهي شكل نقي للطاقة الانتقالية .

تُعد عملية تخزين الطاقة عملية هامة وضرورية جداً — أحياناً — في الكثير من أنظمة توليد القدرة ، فأنظمة توليد القدرة من الطاقة الشمسية تتطلب إما نظاماً لتخزين الطاقة أو مصدراً بديلاً لتزويد الطاقة عندما لا يكون هناك إشعاع شمسية كافية لتوليد الطاقة .

وهناك اعتبارات عديدة يجب مراعاتها عند اختيار وتصميم وتشغيل نظام لتخزين الطاقة :

١ — الكفاءة الكلية للنظام والتي تشمل عملية الشحن ( Charging ) ( process ) وفوائد التخزين ( Storage loss ) وعملية استرجاع الطاقة ( Recovery process ) .

٢ — كثافة تخزين الطاقة وتقاس بوحدة كيلوجول / متر مكعب (  $\text{KJ} / \text{m}^3$  ) أو تخزين الطاقة النوعي ويقاس بوحدة كيلوجول / كيلوغرام (  $\text{KJ} / \text{kg}$  ) .

٣ — معدلات الشحن والاسترجاع ( التفريغ ) القصوى .

٤ — إقتصادية عملية التخزين .

٥ — المشاكل البيئية المصاحبة لعملية التخزين .

٦ — عدد مرات تشغيل — شحن واسترجاع البطاقة — نظام التخزين وعمر هذا النظام .

## ٦ - ٢

### تخزين الطاقة الميكانيكية

#### ٦ - ٢ - ١ تخزين طاقة الحركة : ( Kinetic Energy Storage )

الطاقة الحركية هي الطاقة المصاحبة لحركة كتلة معينة بالنسبة لأخرى ، وفي حالة السرعة الخطية ( Linear Velocity ) فإن طاقة الحركة المصاحبة لكتلة مقدارها ( m ) تتحول بسرعة خطية مقدارها ( V ) تعطى بالمعادلة :

$$K E = \frac{1}{2} m V^2 \quad ( ٦ - ١ )$$

حيث :

m : كتلة الجسم ( kg ) .

V : سرعة الجسم الخطية ( m / s ) .

أما في حالة الحركة الدورانية ، فإن طاقة الحركة يمكن تخزينها في عجلة التطاير أو الحذافة ( Fly wheel ) كالحذافة الموجودة في السيارات والتي تخزن طاقة الحركة خلال الأشواط الفعالة ( أشواط القدرة ) لاستخدام هذه الطاقة في الأشواط غير الفعالة ، وتعطى هذه الطاقة بالمعادلة :

$$K E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad ( ٦ - ٢ )$$

حيث :

I : عزم القصور الذاتي ( Moment of inertia ) للحذافة

ويعطى بالمعادلة :

$$I = \int_0^R r^2 dm$$

حيث :

$R$  : نصف قطر حافة العجل ( m ) .

$m$  : كتلة الحافة للعجل ( kg ) .

$\omega$  : السرعة الزاوية للعجلة ( rad / S ) .

إن تخزين طاقة الحركة في عجلة التطاير يقتضي أن تُصنع هذه العجلة من مادة ذات مقاومة ( قوة ) ميكانيكية عالية وذلك لتحمل الإجهادات العالية التي تتولد نتيجة لقوة الطرد المركزي المصاحبة للسرعات الدورانية العالية للعجلة .

## ٦ - ٢ - ٢ تخزين طاقة الوضع :

( Potential Energy Storage )

إن تخزين طاقة الوضع هو إحدى أقدم الطرق المستعملة وتشمل الزنبركات ( Springs ) وأنظمة الأوزان ( Weight systems ) واللفافات المضغوطة ( Compressed gases ) ومعظم هذه الأنظمة ذات سعات تخزين منخفضة وتُستخدم لتشغيل بعض أنواع الساعات الميكانيكية الكبيرة وساعات اليد والألعاب وغيرها من الأنظمة التي تتطلب سعات تخزين قليلة وأنظمة تخزين صغيرة الحجم . من ناحية أخرى فإن بعض أنظمة تخزين طاقة الوضع مثل الأنظمة الكهرومائية وأنظمة الغاز المضغوط التي تستخدم المضخات والضواغط تعتبر ذات سعات تخزين هائلة .

إحدى الأنواع العامة لتخزين طاقة الوضع هو الزنبرك، وفي حالة الزنبرك الخطي ( معامل المرونة ثابت ) فإن الطاقة المخزنة في الزنبرك :

$$P E = \frac{1}{2} K X^2 \quad ( ٦ - ٣ )$$

حيث :

$k$  : ثابت المرونة للزنبرك ( N / m ) .

X : الاستطالة للزنبرك ( m ) .

أما الأنظمة التي تستخدم الكتلة لتخزين طاقة الوضع فإنها تعمل ببساطة — على رفع كتلة معينة إلى ارتفاع معين ضد قوة الجاذبية الأرضية، وهكذا فإن طاقة الوضع المخزنة في هذه الكتلة :

$$P E = m g \Delta Z \quad (٦ - ٤)$$

حيث :

m : الكتلة ( kg ) .

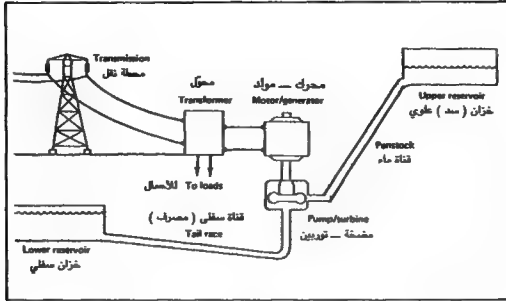
g : تسارع الجاذبية الأرضية (  $g = 9.81 \text{ m / S}^2$  ) .

$\Delta Z$  : فرق الارتفاع ( m )

لتخزين ١ كيلواط — ساعة من الطاقة على شكل طاقة وضع فإنه يلزم رفع كتلة مقدارها ( 1000 kg ) لارتفاع مقداره ( 367 m ) ويستعمل هذا النظام لتخزين كميات كبيرة من الطاقة وذلك بضخ كميات كبيرة من الماء إلى ارتفاع معقول يسمى بنظام تخزين الطاقة بالضغط ( Pumped-Storage Energy System ) . في هذا النظام يستعمل نظام توربين — مضخة إرجاعي ( انعكاسي ) كهرومائي ( Reversible hydroelectric generator-pump ) حيث يتم ضخ المياه من بحيرة أو نهر إلى خزانات ضخمة أو سدود خاصة على ارتفاعات عالية وذلك خلال فترة انخفاض الطلب على الكهرباء ( الطاقة ) ويعاد استعمال هذه المياه ( يعمل النظام كتوربين ) خلال فترة الطلب الأقصى ( الذروة ) على الطاقة ( Peak demand ) وبذلك يتم استرجاع معظم الطاقة المخزنة . الشكل ( ٦ - ١ ) يبين رسماً تخطيطياً لنظام تخزين الطاقة بضخ المياه إلى خزانات ضخمة ( Reservoir ) مرتفعة .

إن معظم الفوائد في نظام التخزين هذا تحدث في التوربين عند عمله كمضخة أو توربين ، وتصل كفاءته في الحالتين إلى ٩٠ ٪ مما يعني أن كفاءة الدورة الكاملة ( عملية الضخ وعملية تشغيل التوربين ) هي  $٠.٩ \times ٠.٩ = ٠.٨١$  . وهناك أيضاً فوائد الاحتكاك في الأنابيب والتي تؤدي إلى انخفاض الكفاءة الكلية للنظام لتصل إلى ٦٥ — ٧٥ ٪ .

ومن الوسائل الأخرى المستعملة لتخزين طاقة الوضع — بواسطة أنظمة



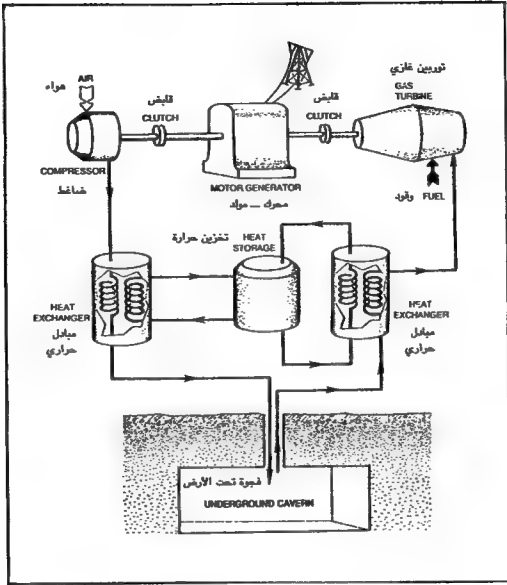
الشكل ( ٦ - ١ )  
رسم تخطيطي لنظام تخزين الطاقة بواسطة  
ضخ المياه إلى سدود أو خزانات خاصة

التخزين بالضغط - ( Pumped-storage systems ) ، هي تخزين الطاقة عن طريق الغاز المضغوط .

وفي هذا النظام يتم ضخ الهواء المضغوط - بواسطة ضواغط - إلى فجوات ضخمة تحت الأرض كمنجم مهجور أو أبار بترول أو غاز طبيعي مهجورة أو كهف طبيعي كبير أو حفرة صناعية .

وتتم عملية الضخ للهواء خلال فترة انخفاض الطلب على الطاقة ، ثم يعاد سحب الهواء المضغوط خلال فترة الطلب الأقصى ( الذروة ) على الطاقة حيث يتم خلطه مع الوقود وحرقه ، ثم تؤخذ الغازات المحترقة المضغوطة إلى توربينات غازية حيث تعتمد هذه الغازات المحترقة لتنتج القدرة المطلوبة خلال فترة الحمل الأقصى أو حمل الذروة ( Peak Load ) للمحطة ، كما هو مبين في الشكل ( ٦ - ٢ ) .

يتناسب حجم الهواء المخزن في هذه العملية تناسباً طردياً مع كمية الطاقة المراد تخزينها وعكسياً مع ضغط الهواء المخزن ، ومن الأفضل المحافظة على



الشكل ( ٦ - ٢ )

نظام تخزين الطاقة تحت الأرض باستخدام الغاز المضغوط

ضغط الهواء المخزن ، ثابتاً قدر الإمكان وذلك لتحقيق أقصى كفاءة لكل من الضاغط والتوربين ويمكن عمل ذلك باستغلال ماء بحيرة أو نهر أو خزان ضخم وذلك بغمور مكان التخزين ( الفجوة ) بالماء ، ثم يتم بعد ذلك ضخ الهواء المضغوط إلى الفجوة لطرد المياه باتجاه معاكس عبر خط التزويد إلى مصدرها .

ويساعد الضغط الهيدروإيكلي المتولد من هذه العملية في المحافظة على ضغط الغاز ثابتاً إلى حد كبير عند إضافة أو سحب الهواء من الفجوة (مكان التخزين) .



## تخزين الطاقة الكيميائية

في الواقع فإن الطاقة الكيميائية هي نوع مخزن من الطاقة وهي أكثر أشكال الطاقة المخزنة كثافة حيث أن قيمة تخزين الطاقة النوعي ( القيمة الحرارية كيلوجول / كغم) لهذا الشكل من الطاقة هي الأعلى من بين بقية الأشكال المخزنة باستثناء الطاقة النووية .

فجميع أنواع وقود المستحاثات والتي تشكل المصدر الرئيس للطاقة في العالم في وقتنا الحاضر إنما هي طاقة كيميائية مخزنة .

تعتبر عملية تخزين الهيدروجين بشكله الذري ( H ) أو الجزيئي ( H<sub>2</sub> ) العملية الرئيسة لتخزين الطاقة الكيميائية، ويرى بعض المختصين أن الجنس البشري سيتحول في اعتماده على الطاقة إلى الهيدروجين كمصدر رئيس للطاقة عند نفاد الاحتياطي من وقود المستحاثات .

يعتبر الهيدروجين نوعاً ممتازاً من الوقود ، وذلك لأن ناتج احتراقه الرئيس هو الماء ويمكن أن يعاد استخلاصه من الماء مرة أخرى بطرق معينة ليعاد حرقه .

تطورت الأنظمة المستخدمة في إنتاج وتخزين الهيدروجين تطوراً كبيراً ، ومن الطرق المتبعة في تخزين الهيدروجين تخزينه على شكل غاز عند ضغط مرتفع أو كسائل عند درجات حرارة منخفضة ، ويمكن تخزينه كذلك في هيدريدات المعادن ( Metal hydrides ) . الجدول ( ٦ - ١ ) يبين خصائص بعض هذه الهيدريدات .

ولكون غاز الهيدروجين ذا كثافة منخفضة فإن تخزين كمية معقولة من الطاقة لهذا الغاز تحتاج لضغط عالٍ جداً أو حجم كبير .

Hydride	Hydrogen Storage by Weight (%)	Energy Density (J/g)
MgH <sub>2</sub>	7	9,916
MgNiH <sub>4</sub>	3.2	4,477
FeTiH <sub>1.99</sub>	1.75	2,469
Liquid hydrogen	100	141,838
Gaseous hydrogen	100	141,838

الجدول ( ٦ - ١ )

خصائص بعض هيدريدات المعادن

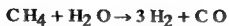
وتتطلب عملية إسالة الهيدروجين ( Liquifaction ) طاقة كبيرة تضيق حوالى ٣٠ ٪ إلى تكاليف إنتاج وتخزين الهيدروجين .

أما عملية تخزين الهيدروجين في هيدريدات المعادن ، فإنها تكون على حساب فواقد حرارية وأوزان كبيرة بالإضافة إلى مشكلة تلوثه وإفساده ( Contamination ) أو إفساد الهيدريدات بواسطة الأكسجين أو الماء أو كليهما مما يؤدي إلى انخفاض السعة التخزينية للهيدروجين بشكل كبير .

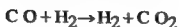
ويمكن إنتاج الهيدروجين من عدة تفاعلات كيميائية من أشهرها التحليل الكهربائي للماء ( Electrolysis ) حيث يمرر تيار مباشر خلال محلول سائل موصل ( أيوني ) مما يؤدي إلى إنتاج الهيدروجين على أحد الأقطاب والأكسجين على القطب الآخر، وتصل كفاءة هذه العملية الفعلية إلى ٨٥ ٪ ولكن لكون الكهرباء هي العامل المستعمل في التحليل والتي هي أصلاً محولة عن طاقة ميكانيكية التي هي بدورها محولة عن طاقة حرارية فإن الكفاءة الكلية الفعلية لإنتاج الهيدروجين تنخفض إلى ٣٥ ٪ .

وحيث أنه بالإمكان تحضيره بسهولة أكبر من وقود المستحاثات وكفاءة تحويلية أعلى فإن طريقة التحليل الكهربائي للماء تستعمل فقط عندما يكون الغرض هو الحصول على هيدروجين نقياً جداً .

معظم الهيدروجين المنتج في الوقت الحاضر يحضر من الميثان في عملية إعادة تشكيل البخار ( Steam reforming process ) والتي تجري عند درجة حرارة ٩٠٠°س. ويستخدم هذا النظام غاز الميثان لإنتاج الهيدروجين حسب التفاعل :



وهذا التفاعل هو تفاعل ماص للحرارة ( Endothermic ) ويتطلب حرارة مقدارها حوالي ( 30 KJ / K mol of C H<sub>4</sub> ) ، اما اول اكسيد الكربون المنتج في هذا التفاعل فإنه يستعمل لإنتاج المزيد من الهيدروجين حسب التفاعل — يتم عند درجة حرارة ٤٠٠° س — .



وهناك بحوث متعددة لإنتاج الهيدروجين بطرق أخرى مختلفة .

## تخزين الطاقة الكهربائية

يعتبر المرمك أحد أجهزة تخزين الطاقة الكهربائية حيث انه يخزن الطاقة الكهربائية على شكل طاقة كيميائية ، فعند شحن المرمك تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة كيميائية في تفاعل كيميائي ماص للحرارة ، وعند تفريغه فإن المتفاعلات تتحد بعضها مع بعض في تفاعل طارد للحرارة ينتج الطاقة الكهربائية بشكل مباشر .

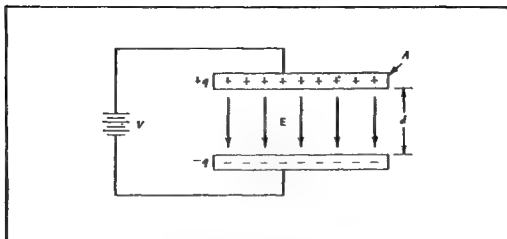
يتم تخزين الطاقة الكهربائية ككهرباء في مجالات كهربائية ساكنة ( Electrostatic fields ) او مجالات طاقة حثية ( Inductive energy fields ) .

### ١ - تخزين الطاقة الكهربائية في مجال كهروستاتن :

إذا وصلت صفيحتان متوازيتان موصلتان مساحة كل منهما ( A ) والمسافة بينهما مفرغة Vacuum ( d ) بمرمك له قوة دافعة كهربائية ( V ) كما هو مبين في الشكل ( ٦ - ٢ ) فإن الشحنات الكهربائية ستتوزع بحيث ان كل صفيحة تحمل شحنة كهربائية مساوية لشحنة الصفيحة الأخرى بالمقدار ومخالفة لها بالإشارة . ويكون فرق الجهد النهائي ( V ) بين الصفيحتين مساوياً للقوة الدافعة الكهربائية للمرمك ( e m f ) ويتولد مجال كهربائي منتظم ( E F ) — بإهمال تأثيرات الحوافي للصفيحتين — بينهما .

وبما ان هناك شغلاً يبذل لإعادة توزيع الشحنات بشكلها النهائي فإن هذا يعني ان المجال الكهربائي في الفراغ بين الصفيحتين يعمل كخازن للطاقة .

يُسمى الجهاز المبين في الشكل ( ٦ - ٢ ) بالمكثف ( Capacitor ) الكهربائي، كما يطلق على النسبة بين الشحنة الكهربائية ( q ) إلى فرق الجهد



الشكل ( ٦ - ٣ )  
مكثف كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين

( V ) اسم السعة الكهربائية ( Capacitance ) وتقاس هذه السعة بوحدة الفاراد ( Farad ) .

الطاقة الكهربائية المخزنة في المكثف :

$$E_c = \frac{1}{2} C V^2 \quad ( ٦ - ٥ )$$

حيث :

C : السعة الكهربائية بالفاراد

V : فرق الجهد النهائي بين صفيحتي المكثف بالفولت

في حالة مكثف الصفيحتين المتوازيتين فإن السعة الكهربائية :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad ( ٦ - ٦ )$$

حيث :

$\epsilon_0$  : سماحية ( Permittivity ) الفراغ

$$( \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{Farad}}{\text{m}} )$$

وتعطي شدة المجال الكهربائي ( E F ) بين صفيحتي المكثف .

بالمعادلة :

$$E F = \frac{V}{d} = \frac{q}{C d} \quad ( ٧ - ٦ )$$

وبالاستعانة بالمعادلة ( ٦ - ٦ ) فإن :

$$E F = \frac{q}{\epsilon_0 A} \quad ( ٨ - ٦ )$$

وإذا ملأ الفراغ بين الصفيحتين بمادة عازلة فإن سُمحية الفراغ (  $\epsilon_0$  ) تستبدل بسُمحية تلك المادة (  $\epsilon$  ) .

من خصائص المكثف الكهربائي ، أنه يبقى محتفظاً بالشحنات الكهربائية لفترة من الزمن بعد فصله عن مصدر الجهد الكهربائي إذا كان هذا المكثف معزولاً بشكل جيد .

تعتمد كمية الطاقة التي يخزنها المكثف الكهربائي على حجمه ونوعية المادة العازلة المستخدمة والتي تصنف حسب النسبة بين سُمحيتهما إلى سُمحية الفراغ (  $\epsilon / \epsilon_0$  ) وتسمى هذه النسبة بثابت العازلية ( K ) ( Dielectric Constant ) . الجدول ( ٧ - ٦ ) يبين ثابت العازلية ( K ) وشدة العازلية ( Dielectric strength ) لبعض المواد .

مثال :

ما هي مساحة مكثف كهربائي ذي صفيحتين متوازيتين يفصل بينهما مسافة مقدارها ٥ مم ووسط عازل مصنوع من الورق ( Paper ) إذا كان هذا المكثف يخزن طاقة مقدارها ٢,٦ × ١٠<sup>٧</sup> كيلوجول .

من الجدول ( ٧ - ٦ ) فإن أقصى انحدار للمجال الكهربائي ( Electric field gradient ) هو 14 K V / m

ولهذا فإن أقصى فرق جهد :

$$V_{\max} = 14 \frac{K V}{m} \times 5 m = 70 K V$$

Insulator	$\epsilon / \epsilon_0$ Dielectric Constant	Dielectric Strength (kV/mm)
Vacuum	1.00000	$\infty$
Air	1.00054	0.8
Nylon	3.5	59
Paper	3.5	14
Pyrex glass	4.5	13
Polyethylene	2.3	50
Teflon	2.1	60
Titanium dioxide	100	6

الجدول ( ٦ - ٧ )  
ثابت العازلية وشدة العازلية لبعض المواد

$$E_c = \frac{C V^2}{2}$$

$$3.6 \times 10^6 = \frac{C (70 \times 10^3)^2}{2}$$

$$C = 0.001469 \text{ farad}$$

من الجدول ( ٦ - ٧ ) فإن ثابت العازلية لمادة الورق  $\epsilon / \epsilon_0 = 3.5$   
بإعادة كتابة المعادلة ( ٦ - ٦ ) على النحو :

$$C = \frac{\epsilon_0 \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) A}{d}$$

$$0.001469 = \frac{8.85 \times 10^{-12} (3.5) A}{0.005}$$

مساحة لوح المكثف :

$$A = 2.371 \times 10^5 \text{ m}^2$$

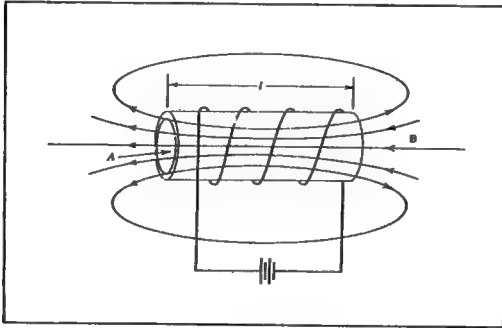
وهذا يعني أنه لو كان لوح المكثف مربع الشكل فإن طول ضلعه  $L$  هو :

$$L = \sqrt{2.371 \times 10^5}$$

$$= 486.93 \text{ m}$$

٢ — تخزين الطاقة الكهربائية في مجال حثي :

إذا وصل ملف لولبي نوقلب ( مركز ) هوائي ( Air core coil )  
( or solenoid ) بمركم كما هو مبين في الشكل ( ٦ - ٨ ) فإنه بعد فترة من الزمن  
يحصل ما يلي :



الشكل ( ٦ - ٨ )

ملف لولبي ( طول اللفات  $l$  ومساحة المقطع  $A$  )

١ — يتولد تيار ثابت (  $I$  ) في الدائرة .

٢ — يتولد مجال مغناطيسي ثابت في وحول الملف اللولبي .

لتوليد المجال المغناطيسي المذكور فإنه يلزم شغل ( طاقة ) وذلك بسبب تولد قوة دافعة كهربائية معاكسة للتيار في البداية ، وتعتمد هذه القوة الدافعة



الكهربائية ( e m f ) على معدل تغير التيار الذي يعتمد بدوره على الخصائص الفيزيائية لللفات الملف ( Windings ) .

ولقد أثبتت التجارب العملية أن نسبة القوة الدافعة الكهربائية ( e m f ) المعاكسة إلى معدل التغير في التيار ثابتة لتركيبية معينة من اللفات وتسمى هذه النسبة بالمحثة ( Inductance L ) وتقاس بوحدة الهنري ( Henry H ) .

$$L = \frac{|e m f|}{d i / d t} \quad (٩ - ٦)$$

الطاقة المخزنة في المجال المغناطيسي :

$$E_i = \frac{1}{2} L I^2 \quad (١٠ - ٦)$$

حيث :

L : المحثة بالهنري ( H )

I : التيار النهائي الثابت بالأمبير

وللملف اللولبي فإن :

$$L = \mu_0 n^2 \ell A \quad (١١ - ٦)$$

حيث :

n : عدد اللفات

$\mu_0$  : النفاذية ( Permeability ) للفراغ

$$(\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6} \text{ H / m})$$

$\ell$  : طول اللفات.

أما العلاقة بين التيار والمجال المغناطيسي B فهي :

$$B = \mu_0 i n \quad (١٢ - ٦)$$

الفرق الرئيس بين المكثف والمحث أنه في حالة المكثف ، فإن الطاقة المخزنة ( شحنة المكثف ) تبقى لفترة من الزمن بعد فصل المكثف عن مصدر الجهد الكهربائي، في حين أن الطاقة المخزنة في حالة المحث تستعاد بكاملها

( تغذى للدائرة الكهربائية ) عند فتح الدائرة ، حيث يتلاشى المجال المغناطيسي مباشرة .

مثال :

ما هو مقدار الطاقة المخزنة في ملف لولبي عدد لفاته ٥٠ ويمر به تيار مقداره ١٠ أمبير إذا كان طول هذا الملف ١٠ سم ومساحة مقطعه ٢ سم<sup>٢</sup> .

$$L = \mu_0 n^2 \ell A$$

$$L = 1.26 \times 10^{-12} \times (50)^2 \times 0.1 \times 2 \times 10^{-4}$$

$$L = 6.3 \times 10^{-8} \text{ H}$$

$$E_i = \frac{1}{2} L I^2$$

$$E_i = \frac{1}{2} \times 6.38 \times 10^{-8} \times (10)^2 = 3.15 \times 10^{-6} \text{ J}$$

## تخزين الطاقة الحرارية

يستخدم نظام تخزين الطاقة الحرارية ثلاثة أشكال للطاقة الحرارية . وهي الطاقة الحرارية المحسوسة ( Sensible-heat ) والطاقة الحرارية الكامنة ( Latent-heat ) والحرارة شبه الكامنة ( Quasi-Latent heat ) وهذا النوع الأخير ليس شكلاً نقياً للطاقة الحرارية إذ أنه يتضمن بعض التفاعلات الكيميائية .

في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة ، يتم تخزين الحرارة برفع درجة حرارة المادة الصلبة أو السائلة . فإذا كانت الحرارة النوعية ثابتة فإن الطاقة الحرارية المخزنة في النظام تتناسب خطياً مع الارتفاع في درجة الحرارة للمادة .

والمشكلة الرئيسية التي تواجه استخدام نظام تخزين الحرارة المحسوسة عند درجات حرارة مرتفعة هي ارتفاع تكاليف جهاز التخزين ، الذي يكون عادة عبارة عن حاوية فولاذية مضغوطة أو فجوة ضخمة تحت الأرض .

تُخزن الطاقة الحرارية الكامنة عند ثبات درجة الحرارة ، حيث تتغير حالة ( طور ) المادة ويكون هذا التغير عادة من حالة الصلابة إلى الحالة السائلة ، ويصاحب التغير اكتساب ( شحن ) أو فقدان ( تفريغ ) كميات كبيرة من الطاقة الحرارية . وتمتاز أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة بأن لها كثافة تخزين أعلى بكثير من تلك التي لأنظمة تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة ، وذلك لكون الحرارة الكامنة لتغير الحالة ( Latent heat of phase change ) مرتفعة للمادة المستخدمة في نظام التخزين ، وعلى سبيل المثال فإن الحرارة الكامنة لانصهار الماء ( الثلج ) تساوي ٣٣٤٩٠٠ جول / كغم والحرارة الكامنة لتبخيره تساوي ٢٢٦٠٠٠٠ جول / كغم ، وتكون الحرارة الكامنة لتغير الحالة دائماً أعلى من

السعة الحرارية للمادة مما يجعل نظام تخزين الحرارة الكامنة أكثر فعالية من نظام تخزين الحرارة المصنوعة .

هناك مجموعة من المواد يطلق عليها اسم الهيدرات ( Hydrates ) تمتاز بارتفاع الحرارة الكامنة لتغير حالتها بالإضافة إلى انخفاض درجات حرارة انصهارها ، وبعض هذه المواد مبين في الجدول ( ٦ - ٣ ) .

في أنظمة تخزين الحرارة شبه الكامنة فإن الطاقة الحرارية يتم تحويلها إلى طاقة كيميائية في تفاعل إرجاعي ماص ( Reversible endothermic ) للحرارة يحدث عند درجة حرارة ثابتة. أما العملية العكسية فتتم بتغيير تركيز أو ضغط المتفاعلات أو بتغيير درجة الحرارة فقط أو بتغيير درجة الحرارة مع الضغط والتركيز . وفي حالة تغيير درجة حرارة المتفاعلات فقط فإن النظام يعمل كنظام تخزين للطاقة الحرارية المصنوعة .

وتتراوح أنظمة تخزين الطاقة الحرارية من الأنظمة البسيطة التي تستخدم الماء أو الهواء الذي يسخن عبر نظام التخزين، إلى الأنظمة المعقدة التي تستخدم فيها التفاعلات الكيميائية الماصة للحرارة على درجة حرارة ثابتة لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كيميائية .

هناك عاملان هامين يؤثران في تصميم نظام تخزين الطاقة الحرارية هما :

١ - معدل فقدان الحرارة الذي يعتمد على المساحة السطحية لنظام التخزين وفعالية العازل الحراري المستخدم حول النظام .

Hydrate	Melting Point (°C)	Heat of Fusion (kJ/kg)	Specific Heat		Density (g/cm <sup>3</sup> )
			Solid (kJ/kg °C)	Liquid (kJ/kg °C)	
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .12H <sub>2</sub> O	88	260	0.46	1.03	1.65
Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> .3H <sub>2</sub> O	58	264	0.60	1.00	1.30
LiNO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O	30	306	0.58	0.94	1.44
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	18	186	0.54	1.00	1.51
l(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O) + 1.5(NH <sub>4</sub> Cl)	11	162	0.41	0.77	1.48

الجدول ( ٦ - ٣ )  
خصائص بعض الهيدرات

٢ — كثافة الطاقة المخزنة. وهي الطاقة المخزنة لكل وحدة حجم وتقاس بوحدات جول / متر مكعب .

وبشكل عام فإن نظام تخزين الطاقة الحرارية ذو السعة الكبيرة يمتاز بأن نسبه ( المساحة السطحية / الحجم ) له تكون أقل ما يمكن .

ويمكن تقسيم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية إلى :

١ — أنظمة ذات درجات حرارة منخفضة تعمل تحت درجة حرارة ١٥٠° س وتخزن فيها الطاقة الحرارية المحسوسة في الماء أو الصخور أو الطاقة الحرارية الكامنة في الثلج أو بعض أنواع الأملاح مثل ملح جلوپر ( Glauber's salt ) (  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  ) أو الشمع البرافيني أو الأحماض الدهنية. وتستعمل هذه الأنظمة أحياناً لتزويد البيوت بالحرارة في الشتاء للتدفئة .

٢ — الأنظمة ذات درجات الحرارة المتوسطة والعالية. تستعمل هذه الأنظمة بكثرة في تدفئة البيوت والصناعة ويتم فيها تخزين الحرارة بتسخين الصخور أو الطوب أو الحديد أو السيراميك .

إن هذه الأنظمة تعتبر ذات تكاليف عالية بالإضافة إلى صعوبات تشغيلها ولذلك فهي لا تحظى بالاهتمام الكثير .

مثال :

ما هو حجم الحاوية اللازم لتخزين ٦٥ ميغاواط — ساعة من الطاقة الحرارية المحسوسة في بخار الماء المشبع عند درجة حرارة ٢٠٠° س إذا كانت قيمة الانتالبي للبخار عند هذه الدرجة هي ٢٧٩,٢ كيلوجول / كغم وحجمه النوعي هو ١,٢٧ م<sup>٣</sup> / كغم .

كمية البخار اللازمة :

$$\text{Quantity of steam} = \frac{65 \times 10^6 \times 60 \times 60}{279.3 \times 10^3} \\ = 8.3781 \times 10^5 \text{ kg}$$

الحجم اللازم :

$$V = \frac{0.127 \times 3.61 \times 65 \times 10^9}{279.3 \times 10^3}$$

$$= 1.064 \times 10^5 \text{ m}^3$$

وهذا الحجم يكافئ حجم خزان اسطوانى قطرة ٦٠ متراً وارتفاعه ٤٠ متراً ، وإذا أخذت الفواقد بعين الاعتبار فإن هذا يعني أن الحجم المطلوب يكون أكبر من الحجم المحسوب .

مثال :

احسب مقدار الطاقة المخزنة لكل وحدة كتلة في حجم من  $\text{Na}_2 \text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2 \text{O}$  مقداره  $2 \text{ م}^3$  إذا كان مدى تغير درجة الحرارة هو من  $15^\circ \text{C}$  —  $50^\circ \text{C}$  .

$$Q = C_{\text{solid}} m (T_{\text{fusion}} - T_{\text{low}}) + L_{\text{fusion}} m$$

$$+ C_{\text{liquid}} m (T_{\text{high}} - T_{\text{fusion}})$$

$$m = \rho V = 1.51 \times 3 \times (10^2)^3 = 4.53 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$Q = [ 0.54 \times (18 - 15) + 186 + 1.0 \times (50 - 18) ]$$

$$\times 10^3 \times (4.53 \times 10^3)$$

$$Q = 994.9 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\frac{Q}{m} = 219.6 \times 10^3 \text{ J / kg}$$

• • •

الفصل السابع  
ترشيد استهلاك الطاقة





## فوائد وأهمية ترشيد استهلاك الطاقة

هناك فوائد عديدة يمكن أن نجنحها من برامج ترشيد استهلاك الطاقة يمكن تلخيصها بأربعة فوائد هامة :

١ - حفظ وترشيد مصدر هام وقيم: تشير الدراسات والبحوث - وكذلك الإجراءات العملية التي اتخذت في عدد من البلدان - إلى أنه بالإمكان توفير كميات كبيرة من الطاقة بتطبيق برامج ترشيد الاستهلاك دون التأثير على مستوى المعيشة لأفراد المجتمع .

٢ - كسب المزيد من الوقت وإتلفة الفرصة لتطوير مصادر بديلة للطاقة: تشير دراسات الخبراء إلى أن الإنسان بحاجة إلى فترة زمنية تتراوح ما بين ١٠ - ٢٥ سنة لتطوير مصادر بديلة وفعالة للطاقة خصوصاً في مجال الانشطار النووي، ولا شك بأن ترشيد استهلاك وقود المستحاثات ( الفحم والبتروول والغاز ) التي هي المصادر الرئيسية للطاقة في الوقت الحاضر يعطى المزيد من الوقت لتطوير تلك المصادر البديلة .

٣ - تقليل تلوث البيئة: كما رأينا سابقاً فإن واحدة من المشاكل الرئيسية التي تواجه المصادر البديلة والمصادر الحالية للطاقة على السواء هي مشكلة التلوث حيث ان المصدر الوحيد الحالي من التلوث تقريباً هو الطاقة الشمسية، ولا شك بأن استغلال هذا المصدر والتقليل من استعمال المصادر الأخرى يساهم في التقليل من حجم مشكلة التلوث .

٤ - التقليل من اعتماد البلدان المستوردة للطاقة على وارداتها من الدول الأخرى

المصدرة لها، فترشيد استهلاك الطاقة يساهم في توفير مبالغ طائلة تدفعها الدول المستوردة للطاقة ثمناً لمستوردياتها .

هناك طريقتان أساسيتان يمكن اتباعهما لحفظ وترشيد استهلاك الطاقة ، وهما :

١ — اتباع سياسة ( شد الحزام ) وذلك بالاستغناء عن بعض المتطلبات غير الضرورية .

٢ — استعمال الطاقة بفعالية أكبر ( تقليل الفواقد ) مع المحافظة على نفس المعدل من الاستهلاك مع وجود القناعة بهذا الاستهلاك .

## حفظ الطاقة وتأثير العامل الشخصي

يعتمد نجاح أي مشروع أو برنامج لحفظ الطاقة على تعاون أفراد المجتمع في هذا المجال والذين هم الهدف الأول والأخير لمثل هذا البرنامج .

من دراستنا السابقة عرفنا أن أحد العوامل الرئيسية التي تزيد من استهلاك الطاقة هي زيادة معدل استهلاك الفرد من الطاقة . وهناك عامل آخر يرتبط بهذا العامل وهو الزيادة في الخسائر ( الفواقد ) في عمليات تحويل الطاقة .

مما لا شك فيه أن الزيادة في معدل استهلاك الفرد من الطاقة يعود بشكل أساسي إلى التغير المستمر في أسلوب ومستوى معيشة الأفراد حيث أن التحول من اعتماد الإنسان على عضلاته إلى الاعتماد على الآلات في ازدياد مستمر .

ولعل التحول إلى استعمال الطاقة الكهربائية والاعتماد عليها في مختلف المتطلبات داخل المنزل يتسبب في زيادة ملحوظة في استهلاك العائلة من هذه الطاقة . والسؤال الذي يطرح نفسه كيف يمكن الحد من تزايد استهلاك الطاقة على المستوى الفردي ؟

المقترحات التالية تقدم بعض الحلول الممكنة على المستوى الفردي :

- ١ - زيادة أسعار الاستهلاك الفائض من الطاقة - الكهربائية خصوصاً - أو فرض ضرائب على هذه الزيادة .
- ٢ - تحديد عدد السيارات التي تقتنيها العائلة .
- ٣ - تحديد عدد الأطفال في الأسرة ( تنظيم النسل ) .

- ٤ — منع استعمال الإضاءة الزائدة وإطفاء الغرف والأماكن الشاغرة .
  - ٥ — استعمال المواصلات العامة ما أمكن ذلك .
  - ٦ — عدم استعمال السيارات للمسافات القصيرة التي يمكن الوصول إليها على الأرجل .
  - ٧ — التقليل من عدد الرحلات الترفيهية وتقصير مسافتها .
- ولا شك بأن هناك فرصاً أخرى عديدة يمكن للأفراد من خلالها ترشيد استهلاك الطاقة ليس هناك مجال لحصرها جميعاً .

## الطلب على الطاقة والتزود بها في المستقبل

للمساعدة في الحصول على صورة واضحة لأهمية حفظ الطاقة فإن ذلك يتم بدراسة متطلبات أو احتياجات الطاقة وطرق التزود بها في المستقبل .

ويمكن دراسة متطلبات الطاقة في المستقبل باستخدام معدلات النمو المتوقعة في الاستهلاك كما مر سابقاً .

إن التقديرات لمصادر الطاقة الرئيسية في المستقبل تشير إلى أن وقود المستحاثات ستبقى هي المصدر الأساسي للطاقة وستلعب الدور الرئيس في المستقبل المنظور .

فالنسب المئوية للطاقة المولدة من المحطات للكهربائية والفحم الحجري والنفط من المتوقع أن تبقى ثابتة حتى منتصف التسعينات .

ومن المتوقع أن تقل نسبة الطاقة المولدة من الغاز الطبيعي خلال هذه الفترة وتزداد أهمية الطاقة النووية التي ينتظر أن تلعب دوراً رئيساً كمصدر للطاقة في المستقبل .

إن اتباع سياسة حفظ الطاقة وترشيد استهلاكها يمكن لها أن توفر نسباً من الطاقة في المستقبل ، ففي الولايات المتحدة — مثلاً — تشير الدراسات إلى أن اتباع إجراءات حفظ الطاقة على المدى القصير ( ١ - ٣ سنوات ) وال المدى المتوسط ( ٤ - ٨ سنوات ) وال المدى الطويل ( أكثر من ٨ سنوات ) ستوفر حوالى ٢٤ ٪ من استهلاك الطاقة عام ١٩٩٠ م .

## ترشيد استهلاك الطاقة في قطاعات الاستهلاك المختلفة

### ٧ - ٤ - ١ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاعين المنزلي والتجاري :

#### ١ - أنظمة البناء :

- (١) اختيار النوافذ بحيث تواجه الأشعة الشمسية لتوفير الإضاءة والحرارة خصوصاً في الشتاء .
- (ب) العزل الحراري كعزل الشبابيك والأبواب وأنابيب التدفئة والتبريد ... وعزل الأرضيات والجدران والسقوف .

#### ٢ - العناية بأنظمة التكييف والتدفئة :

- (١) عزل أنابيب التدفئة .
- (ب) اقتناء منظم لدرجة الحرارة (Thermostat) وضبطه عند قيم محددة ( في الليل يقترح ١٥°س وفي النهار ١٨°س ) .
- (ج) صيانة نظام التدفئة بشكل دوري ( مرة واحدة سنوياً ) .
- (د) التأكد من جودة وفعالية فتيل المدفأة للحصول على احتراق كامل .

#### ٣ - العناية بأنظمة تسخين المياه :

- (١) اقتناء أنظمة تسخين مياه شمسية .
- (ب) اقتناء أنظمة تسخين معزولة حرارياً بشكل جيد .
- (ج) عدم تسخين المياه لأكثر من ٥٠°س لمختلف الاستعمالات المنزلية .

#### ٤ - العنلية بأنظمة التبريد :

- ( أ ) التأكد من ضبط درجة الحرارة عند قيمة معينة بواسطة المنظم .
- ( ب ) عزل مجاري الهواء .
- ( ج ) اقتناء وحدات تبريد صغيرة إذا كان المقصود تكييف أماكن جزئية فقط .
- ( د ) ضبط سرعة المروحة على السرعة القصوى إلا في الأيام الرطبة .
- ( هـ ) تنظيف مرشح الهواء .
- ( و ) استخدام مراوح إضافية في التبريد لنشر الهواء بشكل أفضل في الحيز المكيف .

#### ٥ - أنظمة الإنارة :

- ( أ ) إطفاء أنوار الغرف والأماكن الشاغرة .
- ( ب ) استخدام مصابيح ذات قدرات عالية بدلاً من مجموعة مصابيح ذات قدرات منخفضة .
- ( ج ) استخدام مفاتيح إنارة ذات مستويات مختلفة من الشدة .
- ( د ) المحافظة على نظافة المصابيح السطحية .
- ( هـ ) استخدام مصابيح الفلوريسنت لأنها ذات شدة إضاءة أعلى واستهلاك أقل .

#### ٦ - أمس اقتناء السيارات :

- ( أ ) شراء السيارات خفيفة الوزن الاقتصادية في استهلاك الوقود .
- ( ب ) عدم المبالغة في استخدام أنظمة التكييف والتبريد في السيارة .
- ( ج ) صيانة محرك السيارة بشكل دوري .
- ( د ) المحافظة على ضغط الهواء في عجلات السيارة عند حد معين لأن انخفاض الضغط يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود .
- ( هـ ) استخدام إطارات شعاعية لتوفير طاقة تصل إلى ٥ ٪ .

( و ) التخلص من الأوزان الزائدة في السيارة .

#### ٧ - أنظمة تبريد الطعام والطهي :

- ( أ ) عدم المبالغة في فتح أبواب الثلاجات في المنازل والمتاجر .
- ( ب ) حفظ الطعام عند حرارة ٢° - ٥° س ونظام التجميد عند ١٨° س .
- ( ج ) إزالة الصقيع عن جدران المبرد بانتظام .
- ( د ) الالتزام بإشارات كتب الطهي بخصوص فترة نضج الطعام .
- ( هـ ) استخدام أدوات مطبخ نظيفة من الأسفل ( خالية من طبقة الكربون ) .
- ( و ) المحافظة على الطباخات نظيفة والمحافظة على اللهب الأزرق لهذه الطباخات .

وهناك أيضاً نقاط إرشادية أخرى عديدة تتعلق باستخدام أنظمة الغسيل والخياطة وغيرها من أنظمة استهلاك الطاقة في المنازل والمتاجر .

#### ٧ - ٤ - ٢ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي :

يستهلك هذا القطاع نسبةً عالية من مجموع الطاقة المستهلكة، ولا شك بأن ترشيد استهلاك الطاقة واستخدامها بالطرق الفعالة والمناسبة في هذا القطاع يؤدي إلى تخفيض تكاليف الإنتاج وتوفير مبالغ طائلة على الدولة والمؤسسات الخاصة والأفراد .

يحتاج ترشيد استهلاك الطاقة في هذا القطاع إلى دراسة شاملة ودقيقة لحفظ الطاقة، تأخذ بعين الاعتبار عوامل هامة ورئيسة كتصميم المصنع وأنماط التشغيل وصيانة الأجهزة والمعدات وتوافر أجهزة التحكم والكواثر الفنية المدربة في مجال حفظ الطاقة في المصنع والجنوى الاقتصادية لاستغلال مثل هذه الفرص .

يمكن تقسيم طرق حفظ الطاقة في الصناعة إلى قسمين رئيسين :

- ١ - تنظيم تشغيل وصيانة الأجهزة والمعدات : ومن أهم الأمثلة على ذلك العزل الحراري لأنابيب البخار والماء الساخن وصيانة نقاط تسرب



الهواء في نظام انضغاط الهواء وتسريب البخار من الصمامات والوصلات ،  
وقياس استهلاك البخار والتحكم الأتوماتيكي بدرجات الحرارة للبخار وكذلك يجب دراسة ومتابعة كثافة مختلف الأجهزة والعمليات والأنظمة في المصنع .

٢ — استقلال الطاقة الضائعة : وهي الطاقة الحرارية الخارجة من نظام معين بدرجة حرارة مرتفعة وأعلى بكثير من درجة حرارة الجو مثل الحرارة الضائعة من الغازات العادمة والمواد الساخنة المنتجة في المصنع خصوصاً السوائل. ويمكن استقلال الحرارة الضائعة في السوائل والغازات ذات درجات الحرارة العالية وذلك بتركيب مبادلات حرارية ( Heat-Exchanger ) ومضخات حرارية ( Heat pumps ) .

ومن الأمثلة على ذلك استقلال حرارة الغازات العادمة الخارجة من المراحل البخارية لتسخين مياه التغذية بواسطة مبادلات حرارية فعالة .  
ويمكن للحكومة ان تتخذ بعض الإجراءات لتنظيم استهلاك الطاقة في هذا القطاع ، من أهمها

١ — زيادة أسعار الطاقة المستهلكة بشكل زائد أو فائض .

٢ — فرض غرامات على استهلاك الطاقة الكهربائية من قبل هذه المصانع في فترات الذروة أو الحمل الأقصى ( Peak-load )

٣ — منع استعمال مصادر الطاقة ذات التكاليف المرتفعة لإنتاج الكهرباء كالغاز الطبيعي مثلاً .

٤ — منع أي توسع صناعي غير ضروري .

٥ — تشجيع استعمال المواد البديلة التي يتطلب إنتاجها طاقة وتكلفة أقل مثل العبوات المصنوعة من بعض أنواع الحديد بدلاً من الألمنيوم .

٦ — منع استعمال بعض المنتجات التي يتم التخلص منها بعد استهلاك محتوياتها مثل بعض زجاجات المشروبات التي يتم التخلص منها بعد استهلاك المشروبات ولا تعاد تعيينها .

٧ — تشجيع المنتجات ذات الجودة الأعلى والعمر الأفضل .

٨ — تشجيع إعادة بعض المواد المستهلكة مثل حديد السيارات التالفة .

في الأردن نما استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي في السنوات الأخيرة بشكل سريع حيث كان هذا الاستهلاك يشكل حوالي ٢٠ ٪ من مجموع استهلاك الطاقة الكلي في الأردن عام ١٩٨٠م بينما وصل إلى حوالي ٢٩ ٪ من مجموع الاستهلاك عام ١٩٨٧م .

#### ٧ - ٤ - ٣ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل :

تعد عملية ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل مهمة صعبة نوعاً ما إذ أنها تتطلب إحداث بعض التغييرات في عادات وأنواق وطموحات قطاع كبير من أفراد المجتمع .

ومن الإجراءات الهامة التي يمكن لها أن تؤدي إلى توفير كبير في الطاقة في هذا القطاع ما يلي :

#### ١ — على المدى القصير : ( Short-term measures )

- ( أ ) استخدام السيارات ذات السعة الكبيرة .
- ( ب ) استخدام السرعات الاقتصادية لوسائل النقل المختلفة .
- ( ج ) استعمال السيارات الخصوصية الصغيرة والخفيفة .
- ( د ) التحول إلى استعمال وسائل النقل العام بدلاً من السيارات الخصوصية قدر الإمكان .
- ( هـ ) التخفيف من استعمال وسائل النقل الخاصة للأغراض غير الضرورية كالتنزهات البعيدة والطويلة والزيارات الكثيرة .
- ( و ) استعمال وسائل تخفيف استهلاك الوقود في السيارات مثل بعض أنواع الإطارات ذات معامل الاحتكاك المنخفض .

#### ٢ — على المدى المتوسط والمدى الطويل :

#### ( Midterm & longterm measures )

- ( ١ ) تنظيم مسارات وتقاطعات الطرق والاشارات الضوئية بحيث يؤدي هذا التنظيم إلى تسهيل حركة السير إلى أقصى حد ممكن وتقصير المسافات لوسائل النقل العامة بشكل خاص .

- (ب) تطوير آلات ذات كفاءات أعلى .
- (ج) تطوير أنظمة وشبكات النقل العام ومتابعة هذا التطوير بشكل مستمر .
- (د) تخفيض اقتناء السيارات الزائدة وتشجيع استعمال وسائل النقل العام ذات الكلفة الأقل .
- (هـ) استعمال وسائل النقل العامة التي تستخدم مصادر الوقود الرخيصة كالديزل والفحم الحجري .
- بالنسبة للأردن فإن قطاع النقل يستأثر بأعلى نسبة استهلاك للطاقة، إذ بلغت هذه النسبة ٤٨ ٪ عام ١٩٨٠م من مجموع استهلاك الطاقة الكلي في الأردن وقد تراجعت هذه النسبة إلى حوالي ٣٩ ٪ عام ١٩٨٧م .





**الفصل الثامن**  
**التلوث البيئي الناتج**  
**عن تحويل الطاقة**



## ٨ - ١ تغيرات المناخ

يُسمى المناخ لمنطقة جغرافية صغيرة تتراوح مساحتها بين بضعة مئات إلى الأمتار المربعة إلى بضعة مئات الكيلومترات المربعة بمناخ المنطقة الصغيرة ( المحدودة ) أو المناخ المحلي ( Micro climate ) .

إن مثل هذه المنطقة تتأثر بالمناخ العام بالإضافة إلى تأثيرها بشكل مباشر بعوامل محلية صرفة ليس لها علاقة بالمناخ العام وهذه العوامل هي التي سنركز عليها في هذه الدراسة .

### ٨ - ١ - ١ مناخ المدن

هناك اختلافات واضحة بين مناخ المدن ومناخ الريف ، وهذه الاختلافات معروفة منذ سنين عديدة ولكن أسبابها بدأت تتضح ويُفهم بشكل أوسع في الفترة الأخيرة . فالمدنية عبارة عن منطقة جغرافية ذات كثافة سكانية عالية، ويكون تركيز المخلفات أو النواتج الثانوية المصاحبة لنشاطات الإنسان المختلفة في هذه المنطقة أكبر منها في المناطق الريفية . ومن الأمثلة على هذه النشاطات المؤذية للبيئة بشكل كبير الإنتاج الثقيل والتكرير ومحطات الطاقة المركزية ... وكتنتيجة لذلك فإن هواء المناطق الحضرية ( Urban areas ) يكون بشكل عام مُحملًا بالضباب والدخان والملوثات الغازية .

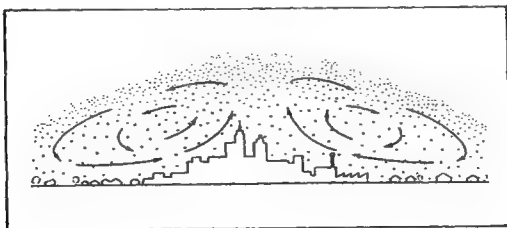
ولا يتوقف تأثير هذه الملوثات على زيادة تأثير البيت الزجاجي ( الأخضر Green house effect ) بل إنها تقوم بامتصاص الحرارة أيضاً، وهذا الامتصاص يعمل على تثبيت ( Stable ) الكتل الهوائية فوق هذه المدن مما يقلل من انتشار وتبثر الملوثات في الجو ويساهم في زيادة تركيزها .

إن المدينة عبارة عن كتل مترصصة من الأبنية، ومواد هذه الأبنية من الحجارة والاسمنت المسلح التي تمتص الحرارة أبطأ بثلاث مرات من التربة العادية والمناطق النباتية الخضراء، ولكنها توصل الحرارة أسرع منها بثلاث مرات ، لذا فإنها تخزن الطاقة الحرارية بكميات أكبر عند درجات حرارة أقل ، وفي الليل فإن هذه البنايات تشع الحرارة للجو أبطأ بثلاث مرات من التربة العادية، ولهذا فإن جو المدن يكون عادة أكثر دفئاً من جو المناطق الريفية أو المناطق الزراعية الخضراء المحيطة بالمدين . الشكل ( ٨ - ١ ) يبين جو المدينة المغلف بقبة من البخار الملوث ( Dust dome ) .

نتيجة للعوامل المحلية ، ليس هناك من حلٍ شافٍ لمشكلة الجو الملوث في المدن ، إلا أنه بالإمكان التخفيف من حجم المشكلة بواسطة اتخاذ بعض التدابير مثل التقليل من الأجهزة المولدة للحرارة كالسيارات والمصانع وكثافة السكان ... وكذلك الحد من عدد البنايات العالية المتقاربة وزيادة المناطق النباتية الخضراء داخل المدن واستعمال مواد متعددة ومختلفة في البناء .

## ٨ - ١ - ٢ الأمطار الحامضية ( Acid rain )

عند انطلاق أكاسيد النيتروجين والكبريت من محطات التوليد الكبيرة فإن هذه الأكاسيد تتحول بسرعة إلى سلفات ونترات ( Sulfate & Nitrates ) ومن ثم



الشكل ( ٨ - ١ )  
قبة الغبار الملوثة فوق المدينة



تتفاعل مع بخار الماء ( الرطوية ) في الجو لتكوين حامضي الكبريتيك والنيتريك ( Sulfuric & Nitric acids ) التي تسقط على شكل مطر يعرف بالمطر الحامضي خصوصاً في المناطق المجاورة لمحطات حرق الفحم الكبيرة . وفي عام ١٩٥٠م لوحظ أن هذه الأمطار الحامضية تمتد إلى مناطق أخرى بعيدة عن مناطق التلوث الجوي كـ بعض المناطق الاسكندنافية ( Scandinavia ) حيث وجد من خلال بعض القياسات لهذه الأمطار بين عامي ١٩٥٧ — ١٩٧٠م في هذه المناطق أن نسبة الحموضة مرتفعة ، أي أن قيمة ( P H ) منخفضة. وتعرف القيمة ( P H ) بأنها سالب اللوغاريتم لتركيز ايون الهيدروجين معبراً عنه بوحدة مول / لتر ( Mole per liter ) وللماء المتعادل تكون قيمة ( P H ) تساوي سبعة (٧) وللأمطار الاعتيادية غير الملوثة تكون هذه النسبة حوالي ٥,٧ بسبب وجود ثاني أكسيد الكربون في الجو .

يُمثل التغير في قيمة ( P H ) من ٥ إلى ٤ زيادة في تركيز ايون الهيدروجين بمقدار عشرة (١٠) ، وأكثر الأمطار حموضة تلك التي هطلت في اسكتلندا عام ١٩٧٤م ، حيث وصلت قيمة ( P H ) لهذه الأمطار إلى ٢,٧ .

للأمطار الحامضية آثار ضارة على البيئة من أهمها :

- ١ — التقليل من غلة النباتات والغابات والحد من نموها .
- ٢ — التقليل من تكاثر الحياة البحرية والأسماك .
- ٣ — تآكل وإتلاف سطوح المعادن المكشوفة .
- ٤ — الحد من نشاطات الكائنات العضوية الدقيقة .
- ٥ — تلاشي المادة الغذائية من التربة والانظمة البيئية المائية .

وقد لوحظ أن الأسماك قد اختفت من البحيرات التي تقل فيها قيمة ( P H )

عن ٤,٦ .

## تلوث الهواء

٨ - ٢ - ١ الملوثات الأولية للهواء الجوي :  
( Primary air pollutants )

إن المواد الأولية المصاحبة للهواء الملوث هي : أول أكسيد الكربون ( CO ) ، والهيدروكربونات ( HC ) ، وأكاسيد الكبريت ( SO<sub>x</sub> ) وأكاسيد النيتروجين ( NO<sub>x</sub> ) ، والدقائق ( الهباب ) الصلبة العالقة ( Particulate matter ) .

## ١ - أول أكسيد الكربون ( Carbon Monoxide CO )

لا يعتبر أول أكسيد الكربون مؤذياً للنباتات — بشكل خاص — إلا إذا تعرضت النباتات لهذا الغاز لفترة طويلة وبتراكيز عالٍ . ولكنه مضر جداً وسام للإنسان والحيوان في حالة تنفسه، حيث أن قابلية الدم لامتصاص أول أكسيد الكربون أكبر بحوالي ٢١٠ مرات من قابليته لامتصاص الأكسجين مما يزيد من خطورته على الإنسان بشكل خاص .

## ٢ - الهيدروكربونات غير المحترقة : ( HC )

وتشمل الهيدروكربونات مجموعة واسعة جداً من المواد الكيميائية ( الوقود ) لها تركيب جزيئي مكون فقط من الكربون والهيدروجين .

أكثر من نصف الهيدروكربونات الموجودة في الجو هي من الميثان (CH<sub>4</sub>)، وهذه المجموعة لا تعتبر خطرة على الصحة عموماً ، ولكن المجموعة الأخرى من الهيدروكربونات — غير الميثان — مثل الألدهيدات ( Aldehydes ) ، والبنتزين

( Benzene ) ، والكيتون ( Ketone ) ، والإيثيلين ( Ethylene ) .. تمثل خطراً على الصحة أكثرها في إحداث تهيج الجلد ( Skin irritation ) والعين وخطر السرطان ( Cancer ) .

#### ٣ - الدقائق الصلبة العالقة : ( Suspended particulates )

كثير من هذه الدقائق التي تنبعث من محطات القوى الكبرى والعمليات الصناعية تعود للأرض كغبار متساقط . ودقائق الغبار الساقط هي تلك الدقائق التي لها أقطار أكبر من ١٠ ميكرومتر (  $10 \mu m$  ) وخطر هذه الدقائق العالقة يعتمد على طبيعتها الكيميائية وتؤثر بشكل خاص على الرئتين والجهاز التنفسي للإنسان .

#### ٤ - أكاسيد الكبريت : ( Oxides of Sulfur )

تنبعث غازات ثاني أكسيد الكبريت (  $SO_2$  ) وثلاثي أكسيد الكبريت (  $SO_3$  ) من أنظمة حرق وقود المستحاثات بنسبة ١ / ٣٠ ويمكن لهذين الغازين التحول إلى أحماض الكبريتيك ( Sulfuric acids ) بوجود بخار الماء في الجو . ولغاز ثاني أكسيد الكبريت (  $SO_2$  ) وحامض الكبريتيك تأثيرات خطيرة على الصحة تتمثل في تهيج وانقباض الشعبات القصية في الرئتين .

#### ٥ - أكاسيد النيتروجين : ( Oxides of Nitrogen )

تنبعث غازات أكسيد النيتريك ( NO ) وثاني أكسيد النيتروجين (  $NO_2$  ) مع عدة أكاسيد نيتروجينية أخرى من عمليات الاحتراق ذات درجات الحرارة المرتفعة .

يعتبر ثاني أكسيد النيتروجين (  $NO_2$  ) ذو تأثير خطر جداً على الصحة ويمكن أن يكون له تأثير قاتل إذا زاد تركيزه عن حد معين .

كما أن كلا الغازين ( NO ) و (  $NO_2$  ) يؤثران على الحياة النباتية ويؤديان إلى إبطاء معدل نموها بالإضافة إلى تأثيرهما الضار على بعض المواد مثل إتلاف ألياف القطن والنيلون وتغيير ( إحداث تلاش ) في لون الصبغات ( Fading of dyes ) .

كما أن التعرض لغاز (  $NO_2$  ) لفترة طويلة بتركيز حوالى (  $150 \mu g/m^3$  ) يؤدي إلى انقباض ( تشنج ) وتورم الشعبات القصية وازدياد احتمال حدوث

مرض مزمن للجهاز التنفسي. ويعدّ خطر أكسيد النيتروجين في إنتاج وتكوين الملوثات الثانوية أكبر من خطرهما كملوثات أولية. وهذه الملوثات الثانوية عبارة عن مجموعة من المواد يطلق عليها اسم المؤكسدات ( Oxidants ) .

## ٨ - ٢ - ٢ تلوث الهواء الثانوي ( Secondary air pollution )

إن العديد من الملوثات الأولية تتفاعل مع بعضها ومع الشمس بتوافر ظروف جوية معينة لتكون ملوثات ثانوية ضارة وسية كالملوثات الأولية وأحياناً أسوأ منها وأشدّ ضرراً .

### ١ — تأثير انقلاب درجة الحرارة ( Temperature Inversion )

يبقى الهواء الملوث فوق المدن ( الأمكن الحضرية ) أحياناً لفترة طويلة في مكانه دون أن ينتشر أو يُخفف أو يبتعد عن المنطقة . واحد الأسباب الأساسية لوضع كهذا ، ما يسمى بانقلاب درجة الحرارة ( Temperature Inversion ) .

تتناقص درجة حرارة الجوّ بانتظام مع زيادة الارتفاع عن سطح الأرض ويعطى معدل انحدار درجة الحرارة الأديابتيكي مع الارتفاع ( Z ) بالمعادلة :

$$\text{Adiabatic lapse rate} = - \frac{dT}{dZ} \quad ( ٨ - ١ )$$

$$= \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right) \left( \frac{g}{R} \right)$$

حيث :

٨ : الأس الايزونتروبي للهواء ويساوي ١,٤١ للهواء الجاف .

M : الوزن الجزيئي للهواء ويساوي ٢٨,٩٧ للهواء الجاف .

وبتعويض هذه القيم بالمعادلة أعلاه نجد أن :

$$- \frac{dT}{dZ} = 0.0099 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{m} \quad ( ٨ - ٢ )$$



أو ما يعادل

$$1 \text{ } ^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$$

إن معدل الانحدار هذا ، له تأثير على ثبات حيز من الهواء ( الملوث ) فوق منطقة معينة، فإذا كان هذا المعدل اكبر من معدل الانحدار الاديابتيكي ، فإن هذا الحيز من الهواء سيكون محاطاً بهواء ابرد منه ومن ثم فإنه سيرتفع للأعلى ، وتسمى هذه الحالة بالجو غير المستقر، أو غير الثابت ( Unstable-atmosphere ) .

وهذا الوضع مرغوب به لأنه سيؤدي إلى ارتفاع الحيز الملوث من الهواء إلى الطبقات العليا من الجو واختلاطه مع حجوم اكبر من الهواء غير الملوث.

وفي حالة كون معدل الانحدار اقل من المعدل الاديابتيكي فإن حيز الهواء الملوث سيتجه للأسفل، ولا شك بأن هكذا وضع غير مرغوب فيه من وجهة نظر نشر الملوثات ، ومن الممكن ان يكون لمعدل الانحدار إشارة معكوسة ( إشارة موجبة ) ، أي ان درجة الحرارة تزداد بازدياد الارتفاع، وهذا الوضع يسمى بانقلاب درجة الحرارة وهو وضع سييء بالنسبة للتلوث لأنه يؤدي إلى ثبات واستقرار الحيز الملوث من الهواء وعدم حركته واختلاطه مع الهواء المحيط به (غير الملوث).

يحدث وضع انقلاب درجة الحرارة عادة في الليل حيث يبرد الهواء الملامس والقريب من سطح الأرض بسرعة اكبر من الهواء البعيد عن هذا السطح .

إن حدوث وضع انقلاب درجة الحرارة يؤدي إلى اتجاه الهواء الملوث للأسفل باتجاه الناس والبيوت ، وقد يؤدي ذلك إلى حالات وفاة إذا كان الهواء الملوث يحتوي على نسبة عالية من أكاسيد الكبريت .

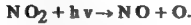
## ٢ — التفاعلات الضوئية الكيميائية : ( Photochemical reactions )

إن الملوثات الثانوية التي تشكل الخطر الأكبر على الصحة في المناطق الحضرية والمزدحمة بالسكان هي نتيجة لتفاعلات كيميائية متتابة ومعقدة وغير مفهومة بشكل كامل حتى وقتنا الحاضر، وجميع هذه التفاعلات تنطلق بتأثير الأشعة الشمسية .

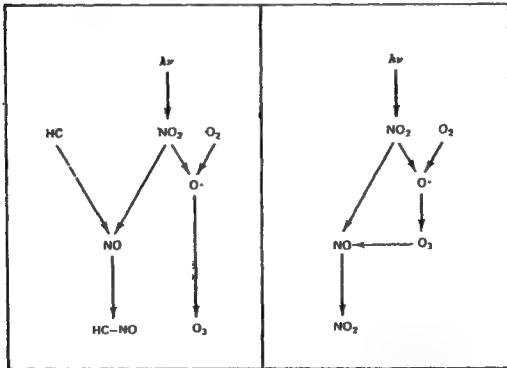
هناك مُؤومان مهمان لهذه التفاعلات هما الأوزون ( Ozone ) والعديد من الهيدروكربونات الأخرى غير الميثان ، ويمجموعها تسمى المؤكسدات — المؤكسد أي مادة يمكن لها أن تسبب حدوث تفاعل التأكسد —

هناك العديد من المؤكسدات الهيدروكربونية ، وبما أن الأوزون يكون دائماً واحداً من المؤكسدات فإنه من الطبيعي أن يعبر عن مستويات ( تركيز ) هذه المؤكسدات بتحديد مستوى الأوزون .

يتم إنتاج الأوزون (  $O_3$  ) في طبقات الجو السفلى بواسطة تفاعل جزيئات الاكسجين مع ذرات الاكسجين المُحررة من تفاعل ضوء الشمس مع ثاني اكسيد النيتروجين كالآتي :



وإذا لم يكن هناك ملوثات أخرى في الجو، فإن التفاعلات أعلاه يتم إبطالها ( Negated ) بواسطة إعادة الاتحاد بين الأوزون (  $O_3$  ) واكسيد النيتريك (  $N O$  ) كما هو مبين في الشكل ( ٢ - ٨ ) .



الشكل ( ٢ - ٨ )  
إنتاج مركبات نيتروجينية عضوية  
بواسطة أشعة الشمس

الشكل ( ٢ - ٨ )  
تسخين خفيف للجو بواسطة (  $NO_2$  )

وتكون الحصلة النهائية للعملية مجرد تسخين بسيط للجو بواسطة امتصاص الفوتونات الضوئية، ولكن بوجود الهيدروكربونات كما هو مبين في الشكل ( ٨ - ٢ ) فإن الأوزون المنتج في الخطوة الأولى يبقى على حاله ويتكون مركب نيتروجيني عضوي (  $\text{H C-N O}$  ) .

ويمكن إنتاج المزيد من الأوزون عن طريق اختزال مركبات لها الصيغة (  $\text{H C O}$  ) بواسطة مركب (  $\text{N O}$  ) والذي ينتج أيضاً مركب (  $\text{N O}_2$  ) .

إن العديد من النترات العضوية (Organic Nitrates) في الجو الملوث تعتبر مؤكسدات قوية جداً وهذه المؤكسدات لها الصيغة التركيبية :



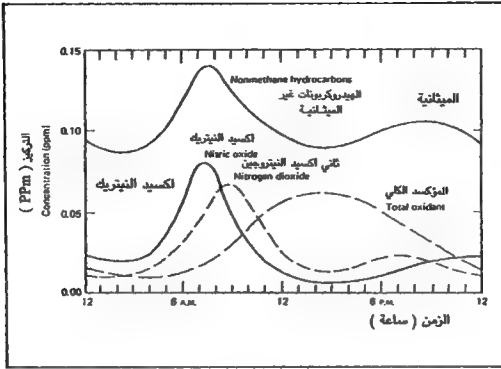
حيث أن ( R ) هي أحد الجذور الألكانية ( Alkane roots ) ولكن على الأغلب فإن (  $\text{R} = \text{C H}_3$  ) . وتعتبر هذه المؤكسدات ذات تأثير مؤذ حيث انها تتلف الأنسجة الجسدية للإنسان وتدمر الحياة النباتية . إن إنتاج هذه المؤكسدات الضارة يرتبط ارتباطاً وثيقاً بإنتاج الملوثات الأولية من أكاسيد النيتروجين (  $\text{N O}_x$  ) .

الشكل ( ٨ - ٤ ) يبين تنامي كل من (  $\text{N O}$  ) و (  $\text{N O}_2$  ) والهيدروكربونات غير الميثانية ( Non - methane hydrocarbons ) والمؤكسد مع الزمن ( الوقت من اليوم ) في جو منطقة حضرية مكتظة بالسكان ووسائل النقل والمصانع ومحطات القوى ...

وكما نلاحظ من الشكل فإن القيم (  $\text{N O}$  ) و (  $\text{N O}_2$  ) العظمى ترتبط بساعات الاندحام الصباحية والمسائية. ويبين الشكل أيضاً أن تكون المؤكسد يبدأ مباشرة بعد طلوع الشمس ويصل إلى ذروته عند الظهر ، ثم يبدأ بالتناقص بعد ذلك طالما أن هناك ضوءاً نهائياً كافياً .

### ٨ - ٢ - ٣ التلوث داخل البيوت : ( Indoor pollution )

هناك أربع ملوثات رئيسة داخل البيوت ، هي غاز الرادون ( Radon ) وأول أكسيد الكربون (  $\text{C O}$  ) والدقائق العالقة كالغبار والمواد العضوية . يعتبر



الشكل ( ٨ - ٤ )  
العلاقة بين تركيز الغازات الملوثة والزمن  
في جو منطقة حضرية (  $1 \text{PPm} = 1.15 \text{mg} / \text{m}^3$  )

غاز الرادون ( $\text{Rn}^{222}$ ) غازاً خاملاً ينتج من الاضمحلال الإشعاعي لعنصر اليورانيوم ، أما الرادون كعنصر مشع ( Radio active ) فيكون باعثاً لجسيمات ألفا (  $\alpha$ -emitter ) ، وهذا النظير له فترة نصف عمر تساوي ٣,٨ يوماً فقط .

ولكن نواتج اضمحلاله هي أيضاً مواد مشعة وتبعث جسيمات ألفا (  $\alpha$  ) .  
وتقوم هذه المواد المشعة بالالتصاق بالدقائق العالقة والغبار وغيرها الموجودة في جو المنزل والتي يمكن أن يستنشقها سكان المنزل . ويعد الإشعاع المستنشق أكثر خطراً على الصحة من الإشعاع الخارجي . ولا يعتبر الرادون مشكلة كبيرة في البيوت التي يشكل الطوب ( Brick ) أو الاسمنت ( Concrete ) جزءاً كبيراً من بنائها ، ولكنه في حالة وجود الكثير من بناء الاسمنت أو الطوب مع عدم توافر التهوية الكافية فإن مستوى الإشعاع يزداد في هذه البيوت عن المستوى العادي بثلاث مرات بفعل اضمحلال اليورانيوم الموجود في مواد البناء هذه .



أما أول أكسيد الكربون فإنه يتكون أساساً كنتيجة لحرق أخشاب الوقود في المنزل — لأغراض التدفئة والاستعمالات الأخرى — وكذلك من المداقيء خصوصاً في حالة عدم وجود تهوية كافية .

الدقائق العالقة هي ألياف أسبستية ( Asbestos fibers ) بشكل أساسي . ويستعمل الأسبست كثيراً في البيوت والمدارس كمادة عازلة ، كذلك في البناء . ولقد تم التعرف منذ سنوات إلى أخطار عديدة لها علاقة بالأسبست كالأضرار التنفسية وسرطان الرئة .

بالنسبة للمواد العضوية فإن هناك العديد منها ذات علاقة بموضوع التلوث داخل المنازل وأكثرها خطراً هو الفورمالدهايد ( Formakdehyde ) الذي يؤدي إلى تدميع العيون ( Watery eyes ) وتهيج الأنف والحلق والرئة عند تركيز يقل عن ( 1 PPm ) حيث ان (  $1 \text{ PPm} = 1.15 \text{ mg} / \text{m}^3$  ) .

## ٨ - ٣

### التحكم في تلوث الهواء وضبطه ( Air pollution control )

#### ٨ - ٣ - ١ التحكم في الدقائق الصلبة العالقة :

إن مصادر التلوث الرئيسية هي مختلف أنواع المركبات ومحطات حرق الفحم الحجري . والملوثات الرئيسية التي يمكن إزالتها أو التخلص منها بشكل فعال هي الدقائق العالقة وغاز ثاني أكسيد الكبريت (  $SO_2$  ) .

هناك عدة طرق مستعملة للتخلص من الدقائق العالقة الموجودة في الغازات العادمة التي تنتجها المحطات والمصانع، ويقاس أداء أي نظام إزالة بواسطة ما يسمى كفاءة التجميع ( Collection efficiency ) لهذا النظام والتي تُعرّف كالآتي :

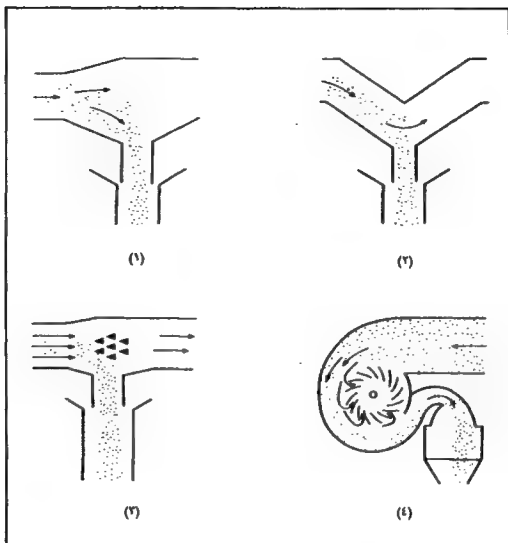
$$CE = \frac{\text{كتلة الغبار المزال}}{\text{كتلة الغبار الموجود}} \quad ( ٨ - ٣ )$$

كفاءة التجميع

وتتراوح قيمة هذه الكفاءة من ٥٠ ٪ لبعض الأنظمة الميكانيكية البسيطة إلى ٩٩ ٪ للمرسب الكهروستاتيكي ( Electrostatic precipitator ) . الشكل ( ٨ - ٥ ) يبين بعض الأنظمة الميكانيكية النموذجية المستعملة في إزالة الدقائق العالقة وهي :

١ — التقليل الفجائي من سرعة الغاز .

٢ — التغيير المفاجيء في اتجاه جريان الغاز .

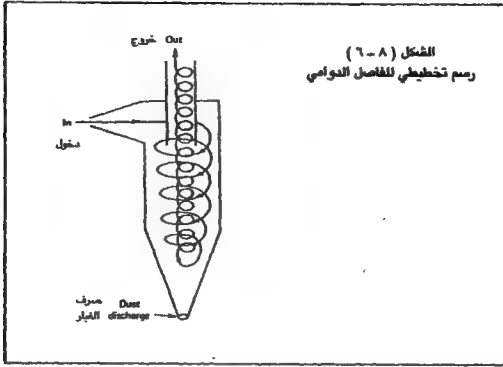


الشكل ( ٨ - ٥ )  
بعض أنظمة ترسيب الغبار الميكانيكية

٣ - اصطدام تيار الغاز بعدد من المصائد .

٤ - استعمال قوة الطرد المركزي، كما هو الحال في مروحة ريشة الرماد ( Cinder-Vane fan ) .

تسمى الأنظمة الثلاثة الأولى في الشكل ( ٨ - ٥ ) بمصائد الرماد

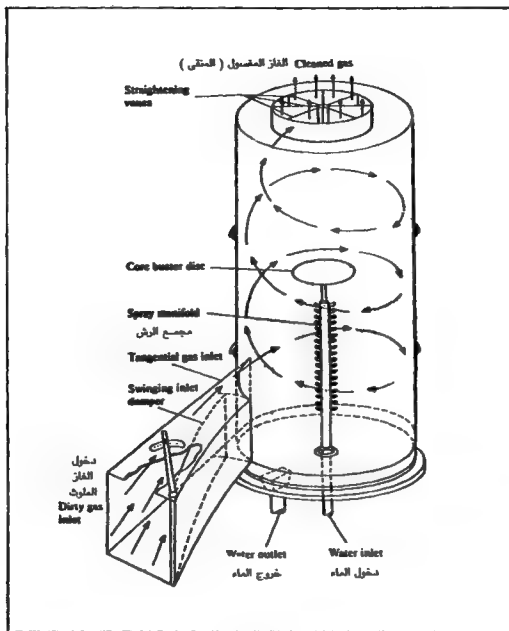


( Cinder Catchers ) وتستخدم عادة في فرن ستوكر ( Stoker ) والاقتران الدوامية الصغيرة التي يُحرق فيها الفحم المهشم عوضاً عن الفحم المسحوق فائق النوعية، وتتراوح كفاءات مصائد الرماد ومروحة ريشة الرماد المبيبة في الشكل ( ٨ - ٥ ) ما بين ٥٠ - ٧٥ %.

وتستخدم الفاصلات الدوامية ( Cydnone Separators ) — كالمبيبة في الشكل ( ٨ - ٦ ) — للحصول على كفاءات تجميعية أعلى منها في حالة مصائد الرماد حيث تصل كفاءة الفاصل الدوامي إلى حوالي ٨٥ % .

ويتلخص مبدأ عمل الفاصل الدوامي بتجميع الدقائق العالقة ( الغبار ) على جدران حجرة الفاصل بواسطة قوة الطرد المركزي ومن ثم ينهار هذا الرماد باتجاه قاع حجرة الفاصل حيث يتم تجميعه والتخلص منه . وتمتاز الفاصلات الدوامية بسهولة صيانتها وانخفاض تكاليف تشغيلها .

ويستخدم جهاز غسل الغاز — كالمبين في الشكل ( ٨ - ٧ ) — لإزالة الدقائق العالقة من الغازات المتولدة في العمليات الكيميائية المختلفة وفي صناعة طحن الحبوب ، ولا يستخدم — في العادة — لإزالة الرماد من الغازات العادمة .



الشكل ( ٨ - ٧ )  
جهاز غسل الغاز

وبعض مشاكل هذا الجهاز هي أن الغاز يبرد كثيراً خلال عملية الغسل مما يتطلب إعادة تسخينه قبل إعادته للمدخنة، ومشكلة انخفاض ضغط الغاز خلال مروره بالجهاز بالإضافة إلى مشكلة تلوث الماء بحامضي الكبريتوز ( Sulfurous acid )

والكبريتيك ( Sulfuric acid ) — والتي تسبب مشاكل التآكل — إذا كان الغاز يحتوي على أكسيد الكبريت . وتبلغ كفاءة التجميع ( الفصل ) لهذا الجهاز حوالي ٩٠ ٪ .

وهناك المرسب الكهروستاتيكي ( Electrostatic precipitator ) المستعمل لإزالة الدقائق العالقة ( الغاز ) من الغازات العادمة، كما هو مبين في الشكل أدناه .

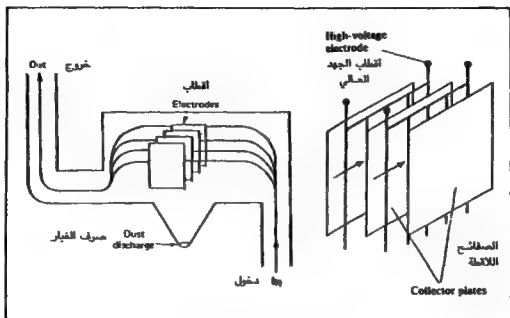
في هذا المرسب ، توضع أسلاك ذات شحنات عالية جداً — ٢٠٠٠٠ — فولت — في مجرى الغاز الملوث بين صفيحتين مؤرضتين ( Grounded plates ) حيث تُشحن الدقائق بشحنة سالبة خلال مرورها عبر الأسلاك ومن ثم تنجذب باتجاه الصفائح المؤرضة التي يتم إزالة الدقائق المترسبة عليها بواسطة طرقها بقطعة من الفولاذ التي يتم رفعها وإسقاطها بواسطة مغناطيس كهربائي بين حين وآخر ، ويتم جمع الغبار المترسب بواسطة أحواض خاصة موضوعة تحت الصفائح .

ويجب أخذ الحيطة عند تشغيل هذا المرسب من احتمال دخول شحنات من الغازات غير المحترقة إليه ، وفي حالة دخولها يجب إيقاف المرسب فوراً عن العمل ( قطع التيار الكهربائي عنه ) لأنها تسبب حدوث شرارات كهربائية بين الأسلاك والصفائح قد تؤدي إلى حدوث انفجار في المرسب . الشكل ( ٨ - أ ) يبين رسماً تخطيطياً للمرسب الكهروستاتيكي .

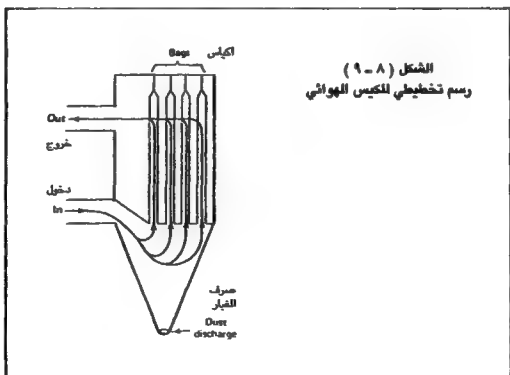
في حين أن المرسب الكهروستاتيكي شائع الاستعمال في محطات التوليد وله كفاءة تجميع تصل إلى ٩٩٪، إلا أنه لا يعمل بشكل جيد عند وجود رماد متطاير ذي مقاومة كهربائية مرتفعة كما هو الحال في الرماد المتطاير عند حرق الفحم الحجري ذي المحتوى المنخفض من الكبريت . وإحدى الطرق المستخدمة لحل هذه المشكلة هي بإضافة غاز ثالث أكسيد الكبريت (  $SO_3$  ) إلى الغازات العادمة لزيادة الموصلية الحرارية للرماد المتطاير .

ومن الطرق المستخدمة في إزالة الدقائق العالقة طريقة الترشيح باستعمال الأكياس الهوائية ( Air - bag ) — كالمبين في الشكل ( ٨ - ب ) .

وتستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في مصانع الاسمنت ومصانع المنتجات الصيدلانية . ويتم تنظيف الأكياس الهوائية بواسطة تمرير الهواء باتجاه



الشكل ( ٨ - ٨ )  
رسم تخطيطي للمرسب الكهروستاتيكي



الشكل ( ٩ - ٨ )  
رسم تخطيطي للكيس الهوائي

معاكس عبر هذه الأكاسيد أو بواسطة طرقها أو هرزا بطرق أتوماتيكية . وتعتبر الأكاسيد الهوائية من الأنظمة ذات الكفاءة العالية لغاية استخلاص دقائق ذات أقطار صغيرة تصل إلى ٠.٢ ميكرومتر . ومن سيئات هذه الأكاسيد أنها ذات تكاليف صيانة وتشغيل مرتفعة .

### ٨ - ٣ - ٢ التحكم في الملوثات الغازية :

تعتبر أكاسيد الكبريت ( $SO_x$ ) - خصوصاً ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) - من الملوثات الأساسية للجو . وتتولد معظم هذه الأكاسيد من محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بوقود المستحاثات . إحدى الطرق المستخدمة لتخفيف نسبة هذه الملوثات في الجو هي بحرق الوقود ذي المحتوى الكبريتي المنخفض خصوصاً الفحم الحجري الذي يحتوي على أكبر النسب من الكبريت . وفي بعض الحالات فإنه بالإمكان إزالة الكبريت من الوقود قبل حرقه كما هو الحال في حرق الوقود الزيتي (Fuel-oil) . ولكون عملية إزالة الكبريت (Desulfurization) عملية مكلفة فإنه تستخدم على نطاق ضيق .

هناك طريقتان أساسيتان للتخلص من غاز ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) :

#### ١ - أنظمة الاسترجاع أو التجديد (Recovery or regenerative)

(systems) في هذه الأنظمة ، فإن المادة المتفاعلة المستخدمة في

امتصاص ثاني أكسيد الكبريت من الغازات الملوثة يتم استرجاعها

لإعادة استخدامها ويكون الناتج النهائي للعملية إما حامض

الكبريتيك ( $H_2SO_4$ ) أو عنصر الكبريت (S) .

#### ٢ - الأنظمة غير المجددة (Non generative system) في هذه الأنظمة

لا يتم استرجاع المواد المتفاعلة وتكون النواتج النهائية للعملية هي

املاح الكالسيوم والمغنيسيوم الكبريتية مثل ( $CaSO_3$ )

و ( $CaSO_4$ ) و ( $MgSO_3$ ) و ( $MgSO_4$ ) .

ترتبط عملية إنتاج أكاسيد النيتروجين الملوثة ( $NO_x$ ) ارتباطاً وثيقاً

بدرجة حرارة الاحتراق وتزداد بازديادها ولهذا فإن واحدة من الطرق الأساسية

للتقليل من هذه الملوثات هي بواسطة تخفيض درجة حرارة الاحتراق ومنع حدوث

النقاط الحارة (Hot-Spots) في الأفران، كما يمكن الحد من تكون أكاسيد

النيتروجين بتخفيض نسبة الهواء / الوقود أو بإعادة التدوير للغازات العادمة

(Exhaust-gas recirculation) .



## التلوث الحراري : ( Thermal pollution )

إحدى مشاكل التلوث المصاحبة لتوليد الكهرباء في المحطات هي مشكلة تلوث الماء . وهناك ثلاث حالات لتلوث الماء في محطات توليد الطاقة :

- ١ - التلوث الكيميائي .
- ٢ - التلوث من المواد الصلبة .
- ٣ - التلوث الحراري .

وسنركز هنا على النوع الثالث من هذا التلوث المصاحب لطرد كميات كبيرة من الطاقة الحرارية إلى البيئة المجاورة للمحطة - خصوصاً الماء - ، حيث أن ضخ كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للمياه الطبيعية المجاورة للمحطة يؤدي إلى حدوث ما يسمى بالتلوث الحراري .

إن إضافة الحرارة للماء يقلل من قدرته على حمل الغازات الذائبة فيه ومن ضمنها الأكسجين الذائب في الماء الذي يعتبر حيوياً وهاماً جداً للحياة المائية ، فإذا زادت درجة حرارة الماء عن ٢٥° م قلّت كمية الأكسجين الذائبة في الماء تصبح غير كافية للكائنات التي تعيش في هذه المياه ، وعلى العكس من ذلك فإن الارتفاع المعقول في درجة حرارة المياه يعزز الحياة المائية ويساهم في نمو النباتات والأسماك بسرعة أكبر .

إن كمية الحرارة المطرودة من المحطة الحرارية إلى المياه - المياه المستعملة في التبريد - يعتمد على كفاءة هذه المحطة ، فإذا فرضنا أن الكفاءة

برارية لهذه المحطة هي ٤٠ ٪ فإن كمية الحرارة التي يتم ضخها للمياه تساوي  
' ٪ من مجموع الطاقة المتولدة من حرق الوقود، أي أن الحرارة التي تساهم في  
لوث الحراري تساوي ١,٥ مرة الحرارة التي يستفاد منها في توليد الطاقة  
فيدة ( الكهربائية ) .

## التلوث الناتج عن النفايات الصلبة : ( Solid-Waste pollution )

إن المحطات التي تستخدم الفحم الحجري كوقود تنتج كميات كبيرة من النفايات الصلبة على شكل رماد . فمحطة حرارية قدرتها ٥٠٠ ميغاواط من الكهرباء - وتعمل بالفحم الحجري نسبة الرماد فيه ١٠ ٪ - تنتج كمية من الرماد مقدارها ٢٠ طناً كل ساعة أو ما يعادل ١٦٥٠٠٠ طن من الرماد سنوياً . بعض الرماد يمكن إضافته للتربة ، أما الرماد المتطاير ( Flyash ) فهو حامضي ويمكن استخدامه في تصنيع الاسمنت والطوب .

وإذا كانت نفس المحطة تستخدم الحجر الكلسي للتخلص من غاز ثاني أكسيد الكبريت فإن ذلك يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم ، فإذا كانت نسبة الكبريت في الفحم هي ٢,٧٢ ٪ فإن كمية ملح الكالسيوم المنتجة تساوي ١٥ ٪ طن في الساعة أو ما يعادل ١٢٠٠٠٠ طن في السنة بفرض أن ٢ ٪ من الكبريت يتحول إلى ملح الكالسيوم .

إن أخطر أنواع التلوث من المواد الصلبة هو التلوث الناتج عن مخلفات المفاعلات النووية الانتشارية حيث أن هذه المخلفات ذات نشاط إشعاعي عالٍ ، وبسبب هذه الكميات الكبيرة من الإشعاع المنبعثة من هذه النفايات النووية فإنه من الضروري جداً عزل هذه المخلفات عن المحيط الحيوي ( Biosphere ) لمدة لا تقل عن ألف ( ١٠٠٠ ) عام حتى يصبح نشاطها الإشعاعي مساوياً للنشاط الإشعاعي للبيرونيوم الخام .

وهناك عدة مقترحات أو مشاريع للتخلص من النفايات النووية . من هذه

المشاريع تثبيت هذه للتفاليات في زجاج سيلكات البورون ( Borosilicate glass )  
ومن ثم تخزين هذا الزجاج في كبسولات محكمة الإغلاق وتخزين هذه الكبسولات  
بعد ذلك في مناجم أملاح عميقة أو آبار محفورة في أرضية المحيط المستقرة  
( Stable ocean floor ) .

• • •

## ملحق رقم (١)

زاوية الارتفاع ( $\beta_1$ ) وزاوية السم ( $\alpha_1$ ) وشدة الإشعاع  
الشمسي الكلي عند اوقات مختلفة من اليوم  
وعلى مدار لشهر السنة ، عند خط عرض ٤٠ شمالاً

(For 40 degrees North latitude; 1.0 clearness factor; 0% ground reflectance)

Date	Solar time		Solar position		Total solar insolation, W/m <sup>2</sup>		
	A.M.	P.M.	Altitude $\beta_1$	Azimuth $\alpha_1$	From normal	Horizontal	South vertical
Jan 21	8	4	8.1	55.3	448	88	245
	9	3	16.8	44.0	733	262	339
	10	2	23.8	30.9	864	400	703
	11	1	28.4	16.0	911	483	797
	12		30.0	0.0	927	517	829
	Surface daily totals, W-h/m <sup>2</sup>				6878	2988	5440
Feb 21	7	5	4.8	72.7	217	32	69
	8	4	15.4	62.2	706	230	337
	9	3	25.0	50.2	863	416	526
	10	2	32.8	35.9	930	561	662
	11	1	38.1	18.9	961	649	744
	12		40.0	0.0	971	681	772
	Surface daily totals, W-h/m <sup>2</sup>				8321	4457	5453
Mar 21	7	5	11.4	80.2	339	145	110
	8	4	22.5	69.6	788	339	281
	9	3	32.8	57.3	889	545	435
	10	2	41.6	41.9	936	687	553
	11	1	47.7	22.6	961	779	630
	12		50.0	0.0	968	810	656
	Surface daily totals, W-h/m <sup>2</sup>				9191	5838	4678

[ يتبع ] † 1 W/m<sup>2</sup> = 0.3173 Btu/h ft<sup>2</sup>.

(Solar position and irradiation values for 40 degrees North latitude)

Date	Solar time		Solar position		Total solar insolation, W/m <sup>2</sup>		
	A.M.	P.M.	Altitude $\beta_1$	Azimuth $\alpha_1$	Direct normal	Horizontal	South vertical
Apr 21	6	6	7.4	98.9	281	63	13
	7	5	18.9	89.5	649	274	38
	8	4	30.3	79.3	794	479	167
	9	3	41.3	67.2	864	652	293
	10	2	51.2	51.4	901	788	397
	11	1	58.7	29.3	920	873	463
	12		61.6	0.0	924	905	485
	Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>				9746	7168	3221
May 21	5	7	1.9	114.7	3	0	0
	6	6	12.7	105.6	454	154	28
	7	5	24.0	96.6	681	359	41
	8	4	35.4	87.2	788	552	79
	9	3	46.8	76.0	842	716	189
	10	2	57.5	60.9	873	842	280
	11	1	66.2	37.1	892	924	340
	12		70.0	0.0	895	949	359
	Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>				9960	8044	2282
June 21	5	7	4.2	117.3	69	13	3
	6	6	14.8	108.4	489	189	32
	7	5	26.0	99.7	681	388	44
	8	4	37.4	90.7	775	574	90
	9	3	48.8	80.2	829	734	148
	10	2	59.8	65.8	857	857	223
	11	1	69.2	41.9	873	933	290
	12		73.5	0.0	879	958	309
	Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>				10,023	8346	1923
July 21	5	7	2.3	115.2	6	0	0
	6	6	13.1	106.1	435	158	28
	7	5	24.3	97.2	656	359	44
	8	4	35.8	87.8	760	548	76
	9	3	47.2	76.7	816	709	183
	10	2	57.9	61.7	848	835	271
	11	1	66.7	37.8	867	914	328
	12		70.6	0.0	870	939	330
	Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>				9651	7987	2213

[ ممتبع ] † 1 W/m<sup>2</sup> = 0.3173 Btu/h·ft<sup>2</sup>.

## (Solar position and irradiation values for 40 degrees North latitude)

Date	Solar time		Solar position		Total solar insolation, W/m <sup>2</sup>		
	A.M.	P.M.	Altitude $\beta_1$	Azimuth $\alpha_1$	Direct normal	Horizontal	South vertical
Aug 21	6	6	7.9	99.5	255	66	16
	7	5	19.3	90.0	602	274	38
	8	4	30.7	79.9	747	473	158
	9	3	41.8	67.9	820	646	281
	10	2	51.7	52.1	857	775	378
	11	1	59.3	29.7	876	860	441
	12		62.3	0.0	883	889	463
Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>					9191	7073	3063
Sep 21	7	5	11.4	80.2	469	136	101
	8	4	22.5	69.6	725	344	265
	9	3	32.8	57.3	839	526	416
	10	2	41.6	41.9	883	665	530
	11	1	47.7	22.6	905	753	605
	12		50.0	0.0	914	785	630
Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>					8536	5636	4463
Oct 21	7	5	4.5	72.3	151	22	30
	8	4	15.0	61.9	443	214	315
	9	3	24.5	49.8	810	397	504
	10	2	32.4	35.6	882	536	640
	11	1	37.6	18.7	917	627	722
	12		39.5	0.0	927	656	750
Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>					7735	4249	5213
Nov 21	8	4	8.2	55.4	429	88	255
	9	3	17.0	44.1	731	258	526
	10	2	24.0	31.0	845	397	680
	11	1	28.6	16.1	892	482	782
	12		30.2	0.0	906	514	813
Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>					6707	2969	5314
Dec 21	8	4	5.5	53.0	281	44	177
	9	3	14.0	41.9	484	205	514
	10	2	20.7	29.4	823	337	697
	11	1	25.0	15.2	883	422	794
	12		26.6	0.0	898	451	829
Surface daily totals, W·h/m <sup>2</sup>					6235	2465	5188

• • •





**ملحق رقم (٢)**  
**المركبة العمودية المباشرة ( I d n )**  
**عند أوقات مختلفة وخطوط عرض مختلفة**

Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W · h/m <sup>2</sup>	Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W · h/m <sup>2</sup>
Jan 21	24	8718	Apr 21	24	9569
$\delta = -20^\circ$	32	7748	$\delta = +11.9^\circ$	32	9696
	40	6878		40	9746
	48	5390		48	9696
	56	3549		56	9532
	64	965		64	9399
Feb 21	24	9569	May 21	24	9557
$\delta = -10.6^\circ$	32	9053	$\delta = +20.3^\circ$	32	9809
	40	8321		40	9960
	48	7344		48	10257
	56	6260		56	10528
	64	4514		64	10937
Mar 21	24	9702	June 21	24	9437
$\delta = 0.0^\circ$	32	9494	$\delta = +23.45^\circ$	32	9721
	40	9191		40	10023
	48	8763		48	10439
	56	8151		56	10837
	64	7237		64	11505
July 21	24	9242	Oct 21	24	9040
$\delta = +20.5^\circ$	32	9494	$\delta = -10.7^\circ$	32	8498
	40	9651		40	7735
	48	9954		48	6789
	56	10212		56	5686
[ يتبع ]	64	10628		64	3902

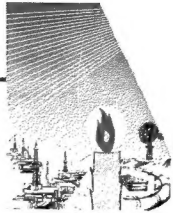
Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W·h/m <sup>2</sup>	Date	Degrees latitude	Direct normal insolation, W·h/m <sup>2</sup>
Aug 21	24	9027	Nov 21	24	8529
$\delta = +12.1^\circ$	32	9147	$\delta = -19.9^\circ$	32	7584
	40	9191		40	6707
	48	9134		48	5257
	56	8983		56	3448
	64	8851		64	952
Sep 21	24	9071	Dec 21	24	8271
$\delta = 0.0^\circ$	32	8851	$\delta = -23.45^\circ$	32	7401
	40	8536		40	6235
	48	8094		48	4551
	56	7464		56	2337
	64	6537		64	76

• • •



عاهد النطيب

## مبادئ تحويل الطاقة



التوزيع : المركز العربي لتوزيع المطبوعات  
بجدة، لبنان

الناشر : دار الشروق للنشر والتوزيع  
عمان، الأردن